CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA EMBARCADAS EM VEÍCULOS SUBMARINOS AUTÔNOMOS

Filipe Pereira Berardi

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Dra. Doina Mariana Baena

Rio de Janeiro
Dezembro de 2025

AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUTURA ADITIVA EMBARCADAS EM VEÍCULOS SUBMARINOS AUTÔNOMOS

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Filipe Pereira Berardi

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professora Dra. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ) (orientadora)

_____

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Daniel Kioshi Kawasaki Cavalcanti (University of Malta)

Rio de Janeiro
Dezembro de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B483 Berardi, Filipe Pereira
Avaliação dimensional de peças fabricadas por manufatura aditiva embarcadas em veículos submarinos autônomos / Filipe Pereira Berardi. — 2025.
104f. + anexo : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 97-104
Orientador: Doina Mariana Baena

1. Processos de fabricação - Avaliação. 2. Submarinos. 3. Análise dimensional. 4. Controle de qualidade - Avaliação. 5. Processos manufaturados. I. Baena, Doina Mariana. (Orient.). II. Título.

CDD 670

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

“A Deus, por guiar meus passos.
Aos meus pais, Luís Gustavo e Érica, raízes da minha vida.
À minha esposa, Larissa, e ao meu filho, Bernardo, minha força e inspiração diária.
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que sempre guia meus passos.

À minha esposa, Larissa, que esteve presente e que, de forma muito especial, sempre me deu força, apoiando-me principalmente nos momentos de maior dificuldade. Ao meu filho, Bernardo, que ilumina minha vida e me dá motivos para continuar sempre buscando dar o melhor de mim.

Aos meus pais, Luís Gustavo e Érica, a quem agradeço pela minha existência e pela forma como me ensinaram a ver a vida. Aos meus avôs João Raça (*in memoriam*) e Sigmair; às minhas avós Marlene (*in memoriam*) e Lena (*in memoriam*); às minhas irmãs, Vanessa e Mariana; e aos meus tios Gilberto (*in memoriam*) e João Luís (*in memoriam*), por estarem sempre ao meu lado desde quando nasci.

À minha orientadora, Prof.ª PhD. Doina Mariana Banea, pela confiança, pela orientação segura e por todo o conhecimento compartilhado, fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

Ao meu amigo Vilson Berilli, que foi o maior incentivador em todas as etapas, desde o início até o final, orientando sempre de forma muito didática e parceira até este momento.

Aos chefes e amigos do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), agradeço a oportunidade de concretizar esta dissertação. Estendo minha gratidão aos diretores do Instituto, CMG (EN) Afonso, CMG (EN) Carla e CMG (EN) Savioli, e a todo o Grupo de Sistemas de Armas (GSA) pelo apoio, na pessoa do CC (EN) Emerson, CT Plínio, CT (EN) Adams, Eduardo (do setor de Metrologia) e demais colegas. Um agradecimento especial à equipe do LabProM — CC (EN) Reinaldo, Pedro Acioly, CT (EN) Paulo Arthur, CT (EN) Sulivan, 1º Ten. (RM2-EN) Campelo e Camile — pelas valiosas sugestões, ideias e iniciativas que tanto enriqueceram o trabalho final.

EPÍGRAFE

"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso,
ao esforço, à dedicação, não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz."
(Ayrton Senna)

RESUMO

AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA EMBARCADAS EM VEÍCULO SUBMARINO AUTÔNOMO

A Manufatura Aditiva (MA) tem se consolidado como uma tecnologia estratégica na produção de peças com geometrias complexas, oferecendo vantagens como personalização, redução de peso, flexibilidade no design, baixo custo de produção, rapidez na fabricação, entre outros benefícios. Vale destacar que apesar dos inúmeros benefícios proporcionados pela MA, ainda existe uma carência de pesquisas focadas em análises dimensionais. A complexidade geométrica das peças fabricadas por MA demanda estudos aprofundados sobre tolerâncias dimensionais, deformações durante o processo e a repetibilidade dos resultados. A ausência de padrões consolidados e metodologias específicas durante a produção de peças mecânicas pode limitar a aplicação da tecnologia em setores que exigem alto rigor técnico, como o aeroespacial, o biomédico e o subaquático. Assim sendo, tendo em vista o crescimento da produção de peças fabricadas por manufatura aditiva a serem utilizadas como produto final, é preciso que pesquisas relacionadas ao controle dimensional da produção acompanhe esse avanço tecnológico. Neste sentido, a avaliação dimensional de peças fabricadas por impressão 3D contribui para atestar a confiabilidade, utilizando o processo de *Fused Filament Fabrication (FFF),* para aplicações em Veículos Não Tripulados (VNTs), com ênfase em Veículos Submarinos Autônomos (VSA), atendendo aos requisitos de tolerância dimensional estabelecidos pela Norma NBR ISO 2768. Com objetivo de identificar os fatores que podem influenciar a precisão dimensional das peças produzidas na pesquisa, foram analisados materiais *PLA* e *ABS*, e também os parâmetros de impressão relacionados ao preenchimento, tais como a variação do tipo da geometria e da densidade de preenchimento. Durante os experimentos, também foram observadas discrepâncias entre os modelos CAD e as peças impressas, as quais foram mapeadas e ajustadas para maximizar a conformidade com as faixas de tolerância especificadas pela norma. As análises confirmaram que a escolha adequada de material, a otimização dos parâmetros de impressão e a configuração do preenchimento foram importantes para alcançar resultados esperados. Os resultados ratificam que é possível fabricar peças 3D com baixo custo utilizando o processo FFF que atendam às exigências dimensionais da NBR ISO 2768 e, consequentemente, que sejam aplicáveis em VSAs, garantindo funcionalidade, desempenho e segurança.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva (MA); *Fused Filament Fabrication (FFF)*; Veículos Submarinos Autônomos (VSA); Tolerância dimensional; NBR ISO 2768; Parâmetros de impressão.

ABSTRACT

DIMENSIONAL EVALUATION OF PARTS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND SHIPPED IN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

Additive Manufacturing (AM) has established itself as a strategic technology in the production of parts with complex geometries, offering advantages such as customization, weight reduction, design flexibility, low production cost, fast manufacturing, among other benefits. It is worth noting that despite the numerous benefits provided by AM, there is still a lack of research focused on dimensional analysis. The geometric complexity of parts manufactured by AM requires in-depth studies on dimensional tolerances, deformations during the process, and the repeatability of results. The absence of consolidated standards and specific methodologies for dimensional control can limit the application of the technology in sectors that require high technical rigor, such as aerospace, biomedical, and underwater. Therefore, given the growth in the production of parts manufactured by additive manufacturing to be used as end products, research related to dimensional control of production must keep pace with this technological advance. In this sense, the dimensional evaluation of parts manufactured by 3D printing contributes to certifying reliability, using the Fused Filament Fabrication (FFF) process, for applications in Unmanned Vehicles (UVs), with an emphasis on Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), meeting the dimensional tolerance requirements established by the NBR ISO 2768 standard. In order to identify the factors that may influence the dimensional accuracy of the parts produced in the research, PLA and ABS materials were analyzed, as well as printing parameters related to filling, such as variation in geometry type and filling density. During the experiments, discrepancies between the CAD models and the printed parts were also observed, which were mapped and adjusted to maximize compliance with the tolerance ranges specified by the standard. The analyses confirmed that the appropriate choice of material, optimization of printing parameters, and fill configuration were important to achieve the expected results. The results confirm that it is possible to manufacture low-cost 3D parts using the FDM process that meet the dimensional requirements of NBR ISO 2768 and, consequently, are applicable in VSAs, ensuring functionality, performance, and safety.

Keywords: Additive Manufacturing (AM); Fused Filament Fabrication (FFF); Autonomous Underwater Vehicles (AUVs); Dimensional tolerance; NBR ISO 2768; Printing Parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Veículos Não Tripulados (a) Aéreo: Drone de Asa Fixa. Fonte: LOPES, 2017 (b) Terrestre: Tanque com Artilharia. Fonte: STRIPES, 2021 (c) Aquático: Veículo de Superfície Não-Tripulado. Fonte: COSTA; MARCONDES, 2025 20
Figura 2 – Exemplos de concepções de VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados) feitos por MA. Fonte: Freepik, 2024 21
Figura 3 – Veículo Terrestre Não Tripulado. Fonte: Autor 22
Figura 4 - Veículo de Superfície. Fonte: CASTRO, 2009 23
Figura 5 - Veículo Submarino Autônomo. Fonte: Autor. 24
Figura 6: Vista de Corte Lateral de um VSA e seus respectivos módulos. Fonte: Autor. 25
Figura 7 – (a) Unidade de Medição Inercial (UMI) (b) Disposição da UMI em um drone. Fonte: Zona Spasial, 2019 28
Figura 8 – DVL (a) marca Nortek (b) Montagem do DVL no VSA. Fonte: Autor. 29
Figura 9 – Categorias de impressão 3D. Fonte: Autor 31
Figura 10 - Etapas do processo de impressão 3D. Fonte: SANTOS; et al., 2021..... 32
Figura 11: Conceito básico do processo de fatiamento. Fonte: Autor. 32
Figura 12: Configuração do SolidWorks para Resolução de STL em alta resolução. Fonte: Autor. 34
Figura 13 – Conversão em STL Resolução Padrão Baixa - (a) Configuração dos parâmetros (b) Visualização da Malha (c) Identificação das dimensões. Fonte: Autor. 35
Figura 14 – Conversão em STL Resolução Padrão Alta - (a) Configuração doa Parâmetros (b) Visualização da Malha (c) Identificação das dimensões. Fonte: Autor. 36
Figura 15 – Conversão em STL Resolução Personalizada em Máxima – 37
Figura 16: a) Filamento PLA b) Filamento ABS. Fonte: Autor. 40
Figura 17: Degradação em função subextrusão. Fonte: PORTELA , 2020 42
Figura 18: Defeito em razão de superextrusão. Fonte: MAGMA3D, 2019..... 43
Figura 19: Sobre material em função da Pata de Elefante. Fonte: 3D Natives, 2023 .. 44
Figura 20: Imperfeição ocasionada pelo empenamento / warping. Fonte: Tech CD, 2021. 44
Figura 21: Delaminação de camadas por temperatura não adequada. Fonte: WEBB, 2020. 45
Figura 22: Fenômeno ghosting. Fonte: MAGMA3D, 2019..... 46
Figura 23: Ocorrência do defeito stringing. Fonte: 3D LAB, 2020 47
Figura 24: Vista Explodida da Popa do VSA. Fonte: Autor. 49
Figura 25: Impressão por FFF da Proa de um VSA. Fonte: Autor. 51
Figura 26: Vista Explodida da seção de lemes. Fonte: Autor. 52
Figura 27: Sistema de Vedação Magnética (a) Peça acoplada ao motor (b) Peça acoplada ao eixo do hélice (c) Elementos em funcionamento. Fonte: Autor. 53
Figura 28: Desenho Esquemático de Alinhamento entre UMI e DVL. Fonte: SBG Systems, 2025. 54
Figura 29: Modelo 3D da fixação do DVL (a) Vista isométrica (b) Vista de corte lateral. Fonte: Autor. 55
Figura 30: Máquina de Medição por Coordenada. Fonte: Autor. 58
Figura 31:Impressora Ender 3 Pro. Fonte: Autor. 59
Figura 32: MMC modelo B-251 Mitutoyo. Fonte: Autor. 60
Figura 33: Melhorias de impressão (a) Configuração de extrusão (b) Medição real de extrusão. Fonte: Autor. 61
Figura 34: Modelo do CP 01. Fonte: Autor. 63
Figura 35: Modelo CP reduzido. Fonte: Autor. 63
Figura 36: Modelo do CP em STL com resolução máxima. Fonte: Autor. 64

Figura 37: Configuração do SolidWorks para resolução máxima. Fonte: Autor. 64
Figura 38: STL com Resolução Máxima no programa Cura. Fonte: Autor. 65
Figura 39: (a) Preenchimento tipo Linha (b) Preenchimento tipo grade (c) Preenchimento tipo giróide. Fonte: Autor. 66
Figura 40: H1 (linha vermelha) e H2 (linha azul): Altura com e sem efeito da pata de elefante, respectivamente. Fonte: Autor. 68
Figura 41: Anomalia “Pata de Elefante” no CP, elucidada na imagem do modelo impresso exibida em projetor de perfil. Fonte: Autor. 70
Figura 42: Esquematização da Produção de Corpos de Prova. Fonte: Autor 72
Figura 43: Fixação do CP na MMC. Fonte: Autor. 73
Figura 44: Informações exibidas pela MMC. Fonte: Autor. 74
Figura 45: Medição do CP 03.1. Fonte: Autor. 75
Figura 46: Visualização no monitor das medidas internas em H1 e H2. Fonte: Autor. 76
Figura 47:Visualização no monitor das medidas externas em H1 e H2. 76
Figura 48: Consistência dimensional do diâmetro interno de todas as séries. Fonte: Autor. 87
Figura 49: Consistência dimensional do diâmetro externo de todas as séries. Fonte: Autor. 88
Figura 50: Média das séries em relação aos desvios-padrão – CPs padrão. Fonte: Autor. 89
Figura 51: Média das séries em relação aos desvios-padrão – CPs reduzidos. Fonte: Autor. 90
Figura 52: Comparação do desvio-padrão das séries CP padrão. Fonte: Autor. 91
Figura 53: Comparação do desvio-padrão das séries CPs reduzidos. Fonte: Autor. 91
Figura 54: Média do desvio-padrão por tipo de preenchimento. Fonte: Autor. 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de Tolerâncias ISO 2768. Fonte: Autor. 57
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos filamentos segundo o fabricante. Fonte: Autor. 60
Tabela 3: Parâmetros de impressão padrão do CURA para PLA. Fonte: Autor. 66
Tabela 4: Parâmetros de impressão CP 02. Fonte: Autor. 67
Tabela 5: Valores inspecionados para as séries CP 01, 02 e 03.1. Fonte: Autor. 68
Tabela 6: Parâmetros de impressão da série CP 03 e subsequentes. Fonte: Autor. 69
Tabela 7:Valores medidos do CP 03.1. Fonte: Autor. 76
Tabela 8: Valores obtidos da série CP 03. Fonte: Autor. 77
Tabela 9: Resultados obtidos da série CP 03. Fonte: Autor. 77
Tabela 10: Valores obtidos da série CP 04. Fonte: Autor. 78
Tabela 11: Resultados obtidos da série CP 04. Fonte: Autor. 78
Tabela 12: Valores obtidos da série CP 05. Fonte: Autor. 79
Tabela 13: Resultados obtidos da série CP 05. Fonte: Autor. 79
Tabela 14: Valores obtidos da série CP 06. Fonte: Autor. 80
Tabela 15: Resultados obtidos pela série CP 06. Fonte: Autor. 80
Tabela 16: Valores obtidos da série CP 07. Fonte: Autor. 81
Tabela 17: Resultados da série CP 07. Fonte: Autor. 81
Tabela 18: Valores obtidos da série CP 08. Fonte: Autor. 82
Tabela 19: Resultados da série CP 08. Fonte: Autor. 82
Tabela 20: Valores obtidos da série CP 20. Fonte: Autor. 83
Tabela 21: Resultados dos valores da série CP 20. Fonte: Autor. 83
Tabela 22: Valores obtidos da série CP 21. Fonte: Autor. 84
Tabela 23: Resultados obtidos da série CP 21. Fonte: Autor. 84
Tabela 24: Valores obtidos da série CP 22. Fonte: Autor. 85
Tabela 25: Resultados obtidos da série CP 22. Fonte: Autor. 85
Tabela 26: Valores obtidos da série CP 23. Fonte: Autor. 85
Tabela 27: Resultados obtidos da série CP 23. Fonte: Autor. 86

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA 4
AGRADECIMENTOS 5
EPÍGRAFE 6
RESUMO 7
ABSTRACT 8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES 9
LISTA DE TABELAS 11
SUMÁRIO 12
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 14
1.1 Motivação 16
1.2 Objetivos 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 17
1.3 Organização do Trabalho 17
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Veículos Não-Tripulados 19
2.1.1 Veículos Aéreo Não Tripulados 20
2.1.2 Veículos Terrestres Autônomos 21
2.1.3 Vantagens e Desvantagens de Veículos Não Tripulados 22
2.1.4 Veículos Submarinos Autônomos 23
2.2. Sistema de Navegação 27
2.2.1 Sistemas Inercias 28
2.2.2 DVL / NUCLEUS. 28
2.3 Manufatura Aditiva (MA) 30
2.3.1 Modelagem 3D e Geração do STL 34
2.3.2. Extrusão de Material 37
2.3.2.1. Parâmetros de Impressão 38
2.3.2.2. Filamentos 39
2.3.3. Problemas na Fabricação 41
2.3.3.1. Subextrusão 41
2.3.3.2. Superextrusão 42
2.3.3.3 Pata de Elefante 43
2.3.3.4 Empenamento / Warping 44

2.3.3.5 Delaminação 45
2.3.3.6 Ghosting 45
2.3.3.7 Stringing 46
2.3.4. Aplicações da MA em VSA 47
2.3.4.1 Proa e Popa 48
2.3.4.2 Flaps / Lemes 51
2.3.4.3. Vedação Magnética 52
2.3.4.4. Estrutura de Fixação do DVL 54
2.4 Inspeção Dimensional 55
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS 59
3.1. Instrumentação e Materiais Utilizados na Produção de CPs 59
3.2. Estudo Preliminar e Considerações para Designação e Produção dos Corpos de Prova (CPs) 60
3.2.1. Modelo CAD e Conversão do arquivo STL 62
3.2.2 Processo de Fatiamento 65
3.2.3 Impressão 3D 69
3.3. Inspeção Dimensional 69
3.4. Metodologia da Investigação 70
3.5 Detalhamento do Processo de Medição 73
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 75
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 94
5.1Trabalho Futuros 95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 97

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Veículos não tripulados têm uma ampla gama de aplicações em diversas áreas como inspeção de infraestruturas, resgate e operações de emergência, logística e entregas, pesquisa científica, aplicações militares e outras. Mahadevan (2010) menciona que o papel militar dos drones iriam ser determinantes nos sistemas de defesa aérea com a superação das limitações técnicas, bem como as melhorias que iriam surgir em tecnologias concorrentes. Segundo Dunbabin, Marque (2012), com o avanço da tecnologia, os veículos autônomos têm se tornado capazes de desempenhar atividades cada vez mais diversas, reduzindo a exposição da vida humana às situações de risco e permitindo ampliar o conhecimento acerca do ambiente marinho.

Especificamente em aplicações militares, Adnan; *et al.* (2022) ratifica que o uso de veículos não tripulados logra contribuir como uma forte vantagem tática, uma vez que podem representar uma extensão de embarcações de guerra e de veículos terrestres, por meio da utilização dos Veículos Submarinos Autônomos (VSA) e/ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT/Drones). Os drones assumiram um papel de liderança no contraterrorismo e na contra insurgência e são projetados para ter uma importância crescente em operações militares. Seu baixo custo os tornam descartáveis, o que é ideal para missões altamente perigosas ou politicamente sensíveis Mahadevan (2010).

Paralelamente, com base no estudo de Ligon, *et al.* (2017), pode-se constatar que a impressão 3D também é amplamente utilizada em diversas áreas. Além disso, de acordo com Mendonça, *et al.* (2020), em muitos casos é possível se obter produtos impressos por MA com acabamento e estruturas confiáveis, de modo que possam ser utilizados como produto final em estruturas mecânicas.

De um modo geral, os propósitos em utilizar a tecnologia MA na produção de veículos autônomos, visam a redução de peso e otimização topológica da estrutura mecânica com objetivo de ampliar o alcance, reduzir o custo de produção dos protótipos e aumentar a velocidade de fabricação Berardi, *et al.* (2024). O que é ratificado nos trabalhos apresentados por Muralidharan, *et al.* (2021) e Radharamanan, *et al.* (2016), nos quais é possível observar exemplos de MA em aplicações com Drones.

Com a contínua evolução dos processos de manufatura aditiva, espera-se que

os VSAs se tornem cada vez mais eficientes, com maior autonomia e capacidade de adaptação a diferentes cenários submarinos. A capacidade de produzir peças sob demanda também facilita a manutenção e reparo de veículos em locais remotos, reduzindo a necessidade de estoques volumosos de componentes (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Dessa forma, a impressão 3D não apenas melhora a eficiência dos VSAs, mas também impulsiona inovações no design e operação desses veículos em aplicações como pesquisa oceânica, exploração de recursos e operações militares.

Entretando, além das dificuldades existentes para projetar, construir, testar e pilotar um drone, utilizar peças produzidas em impressão 3D nas estruturas mecânicas pode incluir outras adversidades como erros de montagem, problemas de dimensionamento, utilizando impressoras 3D (RADHARAMANAN, *et al*., 2016). Adicionalmente, a estimativa inicial do desvio de rota dos veículos autônomos deve incluir contribuições de erro tanto da Unidade de Medição Inercial (UMI) quanto do sistema mecânico que mantém a UMI no posicionamento requisitado (BERARDI; *et al*., 2024). Segundo Looney (2015), compreender o impacto que estes erros têm nas principais funções de um sistema de navegação ajuda a estabelecer metas de desempenho relevantes que evitam sobrecarregar o problema, ao mesmo tempo que gere o risco de perder desempenho chave e compromissos de custos.

Além disso, é importante ressaltar que, de acordo com Grgić, *et al.* (2023), o real estado da arte relacionado especificamente a impressão 3D carece de métodos adequados para resolver problemas derivados dos mecanismos das impressoras, destacando artigos cujo foco trata sobre discrepâncias dimensionais como precisão, tolerâncias, parâmetros de impressão. Adicionalmente, a complexidade do processo de impressão, enfatizando a extensa gama de parâmetros e limites, que também foi enfatizada por Zemicik, Sedlak (2019) ao apresentar uma extensa gama de parâmetros e limites existentes no processo de impressão, que podem influenciar nos requisitos finais das peças.

Em Drozda, Pereira, Patterson (2020), por exemplo, é proposto para a tecnologia FFF, a necessidade essencial de uma análise completa e sistemática da precisão, da tolerância e da repetibilidade do processo de medição. Adicionalmente, Schaechtl, Schleich, Wartzack (2021) destacou imperfeições como folgas nas juntas e desvios geométricos que dependem de parâmetros de processos específicos da máquina. Entretanto, Kacmarcik, *et al.* (2018) demonstram que uma peça de referência relativamente simples pode ser uma boa opção para avaliar eficazmente a precisão de várias características geométricas e revelar diferenças entre duas impressoras 3D de

mesa em qualidade dimensional.

Outro exemplo importante é o apresentado por Pombinha, *et al.* (2018), cujo trabalho trata-se de uma investigação referente a influência da espessura da camada e da densidade de preenchimento na tolerância geométrica de peças produzidas por FFF, entretanto, o estudo de Pombinha, *et al. (*2018) foi realizado apenas para o material Nylon e utilizou uma máquina que possui um custo mais elevado do que a utilizada neste trabalho.

Deste modo, é possível constatar que, apesar da grande diversidade de aplicações que já utilizam a MF na produção de peças a serem utilizadas como produto final, incluindo as voltadas para veículos não tripulados, ainda existe uma lacuna, dentre os trabalhos existentes, relacionada a inspeção dimensional de peças fabricadas por impressão 3D de baixo custo, o que ratifica a fomentação desta pesquisa.

1.1 Motivação

O crescente uso de Veículos Não Tripulados (VNTs) em áreas como defesa, exploração e monitoramento ambiental reforça a demanda por componentes leves, confiáveis e com geometrias complexas. A MA tem se destacado como uma tecnologia estratégica para atender essas necessidades, permitindo a produção de peças personalizadas e de alto desempenho. Em alguns casos, garantir as precisões dimensionais e as tolerâncias pré-estabelecidas pode ser essencial para assegurar a funcionalidade e a segurança desses veículos em aplicações críticas, justificando a importância de pesquisas voltadas ao aprimoramento dos processos de impressão e controle de tolerâncias.

Adicionalmente, a MA com suas diversas técnicas de impressão vem se consolidando ao longo dos anos como alternativa para produção de peças em inúmeros tipos de projetos para a sociedade, os quais também podem necessitar de componentes com especificações de tolerâncias dimensionais para garantir a funcionalidade, o desempenho e a segurança dos equipamentos, o que ratifica uma motivação dual, com emprego tanto para o meio militar quanto para a sociedade civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Verificar a viabilidade de atender às exigências dimensionais e de tolerância estabelecidas pela Norma NBR ISO 2768 na fabricação de peças por MA, utilizando materiais PLA e ABS, ajustando parâmetros de impressão e variando o tipo e a densidade de preenchimento, com o objetivo de introduzir essas peças em aplicações críticas de Veículos Não-Tripulados (VNTs).

1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar a influência dos parâmetros de impressão (como velocidade, temperatura, e altura da camada) na precisão dimensional das peças fabricadas por MA.

Comparar o desempenho dos materiais PLA e ABS, considerando suas características de estabilidade dimensional e compatibilidade com as exigências dos projetos.

Avaliar a influência do tipo e da densidade de preenchimento no comportamento dimensional das peças impressas e na capacidade de atender às tolerâncias especificadas pela Norma NBR ISO 2768.

Identificar as discrepâncias entre o modelo CAD e as peças impressas, mapeando as principais variações dimensionais e os fatores que contribuem para essas diferenças.

Desenvolver um modelo de otimização dos parâmetros de impressão, baseado em testes experimentais, para maximizar a conformidade das peças com as tolerâncias dimensionais da norma.

Testar a aplicabilidade das peças fabricadas por MA em Veículos Submarino Autônomo (VSA), avaliando sua viabilidade estrutural e funcional dentro das exigências específicas desses sistemas.

Propor diretrizes para a produção de peças aditivas que atendam às demandas de tolerância e precisão em aplicações dual (militar e civil).

1.3 Organização do Trabalho

A organização deste trabalho foi definida por uma série lógica numa apresentação coesa das informações abordadas. Iniciando com o Capítulo 1, introduz-se o tema em discussão, seguido pelo Capítulo 2, que compreende a revisão bibliográfica necessária para fundamentar o estudo. No Capítulo 3, são descritos os

materiais e métodos utilizados no experimento. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 4, seguidos pelas considerações finais no Capítulo 5, que encerra o trabalho. As fontes consultadas são listadas na seção de referências bibliográficas ao final do documento.

Na revisão bibliográfica, apresenta uma visão geral sobre veículos não tripulados, citando informações importantes referentes aos componentes correlacionadas com a tecnologia da MA, incluindo métodos de fabricação, parâmetros de impressão, tipos de materiais, suas propriedades mecânicas e principalmente com foco na parte dimensional e tolerância das peças. A pesquisa avança na impressão de diferentes materiais como PLA e ABS, implementados a partir da técnica de Deposição por Filamento Fundido (*Fused Filament Fabrication - FFF),* e segue para a avaliação dimensional das peças, de acordo com a norma NBR ISO 2768.

O capítulo de materiais e métodos detalha os materiais, maquinários e procedimentos utilizados, organizados de acordo com o planejamento do projeto. Cada ensaio é descrito em subcapítulos separados, incluindo normas e conceitos pertinentes.

No capítulo de resultados, são apresentados os dados obtidos referentes às variações dimensionais dos corpos de prova, relacionando-os às propriedades dos materiais, a modelagem 3D, a melhor geração do STL, as configurações dos parâmetros de impressão, e os cuidados com a possibilidades de problemas de impressão.

Por fim, no capítulo de considerações finais e trabalhos futuros, são apresentadas as conclusões do estudo, avaliando a efetividade dos materiais examinados. Após este capítulo, são fornecidas as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme explorado na revisão de Jones, Wang (2021), sistemas de navegação baseados em sensores, GPS, *LiDAR* (*Light Detection and Ranging* – sistema de similar a um radar) e aprendizado de máquina são essenciais para viabilizar a operação segura de veículos autônomos. Entretanto, apesar do desenvolvimento desses veículos exigir componentes de alta qualidade, dependendo da precisão que se é requisitada pelo sistema de navegação, os avanços tecnológicos das últimas décadas têm transformado significativamente a forma como concebem a mobilidade, a produção industrial e o controle de qualidade. A MA, por exemplo, tem revolucionado a produção de componentes críticos para veículos autônomos, pois estudos como o de Patel, Singh, Thompson (2020) mostram que a tecnologia permite a criação de peças complexas, leves e personalizadas com elevada precisão, reduzindo custos e tempos de desenvolvimento. Desta forma, é essencial uma inspeção dimensional adequada das peças fabricadas por MA para serem utilizadas em veículos autônomos, cujo sistema de navegação seja condizente aos objetivos navais. Portanto, neste capítulo exploraremos como cada uma dessas áreas como Veículos Autônomos, Sistemas de Navegação, MA e a Inspeção Dimensional, estão relacionadas com a elaboração da metodologia utilizada e a obtenção dos resultados.

2.1 Veículos Não-Tripulados

Os veículos não tripulados (VNTs), também conhecidos como *UVs (Unmanned Vehicles)*, representam uma classe de sistemas de transporte projetados para operar sem a necessidade de um piloto ou condutor a bordo. Esses veículos podem ser controlados remotamente por um operador ou operar de forma autônoma, dependendo dos sistemas embarcados que combinam sensores, atuadores e algoritmos de controle avançados. A classificação dos VNTs é comumente baseada no ambiente de operação, sendo divididos em veículos aéreos (*Unmanned Aerial Vehicles - UAVs*), veículos terrestres *(Unmanned Ground Vehicles - UGVs)* e veículos aquáticos *(Unmanned Underwater Vehicles - UUVs)* (WERTZ, 2019), conforme exemplos mostrados na figura 1.



(a) (b) (c)

Figura 1 - Veículos Não Tripulados (a) Aéreo: Drone de Asa Fixa. Fonte: *LOPES, 2017* (b) Terrestre: Tanque com Artilharia. Fonte: *STRIPES, 2021* (c) Aquático: Veículo de Superfície Não-Tripulado. Fonte: *COSTA; MARCONDES, 2025*

O avanço das tecnologias aplicadas a VNTs tem sido impulsionado por diversos fatores, como a crescente demanda por soluções inovadoras em segurança, pesquisa científica, agricultura de precisão, logística e exploração de ambientes inóspitos. Além disso, o uso militar desempenhou um papel central na aceleração do desenvolvimento desses veículos, principalmente em tarefas de vigilância, reconhecimento e combate. No entanto, o uso civil também tem expandido rapidamente, com aplicações em monitoramento ambiental, inspeção industrial e transporte de mercadorias (GROOVER, 2020).

Logo, a utilização de veículos não tripulados, combinada com tecnologias avançadas de fabricação, representa uma área de pesquisa estratégica e multidisciplinar. A integração entre sistemas de navegação, engenharia de materiais e técnicas de manufatura possibilita o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis, reforçando a importância de estudos que abordem aspectos técnicos e funcionais desses veículos.

2.1.1 Veículos Aéreo Não Tripulados

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, são aeronaves que operam sem a necessidade de um piloto a bordo. Eles podem ser controlados remotamente ou operar de maneira autônoma, com base em sistemas embarcados de controle e navegação. A utilização desses dispositivos tem crescido exponencialmente em diversas áreas, como agricultura, segurança, logística, entretenimento e pesquisa científica, devido à sua versatilidade e às inúmeras aplicações possíveis (GUPTE, MOHANDAS, CONRAD 2012). Desta forma, a diversidade de aplicações implica em drones produzidos por diferentes concepções, como pode ser observado na figura 2.



Figura 2 – Exemplos de concepções de VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados) feitos por MA. Fonte: *Freepik, 2024*

Os VANTs podem ser classificados com base em diferentes critérios. Uma das formas mais comuns é por porte, que os categoriza em micro, pequenos, médios e grandes. Outra forma de classificação está relacionada ao tipo de propulsão, podendo ser de asas fixas ou rotativas (WATTS, AMBROSIA, HINKLEY 2012). Os drones de asas fixas são mais adequados para percorrer longas distâncias e realizar missões de monitoramento ou mapeamento. Já os de asas rotativas, como os quadricópteros, oferecem maior manobrabilidade e estabilidade, sendo ideais para operações em espaços confinados ou que demandem alta precisão.

Os VANTs têm desempenhado um papel crucial ao integrar peças personalizadas e fabricadas sob demanda por MA. Estudos demonstram que componentes estruturais criados por MA podem reduzir o peso total das aeronaves e melhorar a eficiência do consumo de energia, além de possibilitar designs inovadores que seriam inviáveis com técnicas de fabricação tradicionais (FRAZIER, 2014). Ou seja, desde que se mantenham as características estruturais referente aos esforços que as peças serão submetidas, a otimização topológica e o controle da densidade das peças podem permitir a obtenção de produtos no limiar do peso total. Essa abordagem é especialmente útil em aplicações que requerem soluções rápidas e de baixo custo para substituição de peças em campo (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Os VANTs podem ser pilotados remotamente, em que os comandos de controle são fornecidos por uma estação de base terrestre (BS) por meio de um controle remoto (MOHSAN, *et al.* 2022).

2.1.2 Veículos Terrestres Autônomos

Veículos terrestres não tripulados (VTNTs), figura 3, conhecidos como

Unmanned Ground Vehicles (UGVs), são sistemas robóticos capazes de operar em terra sem a necessidade de operadores humanos a bordo. Podem ser controlados remotamente ou operar de forma autônoma, utilizando sensores e algoritmos avançados. Originalmente desenvolvidos para aplicações militares, hoje os VTNTs possuem aplicações diversas, como agricultura, segurança e exploração de áreas de risco SILVA, 2021.



Figura 3 – Veículo Terrestre Não Tripulado. Fonte: Autor

O emprego dos VTNTs é muito significativo no âmbito militar, pois no setor de Defesa, são utilizados para missões como reconhecimento, desminagem e vigilância. Eles ajudam a minimizar riscos aos soldados, atuando em áreas de combate hostis (COHERENT, MARKET, INSIGHTS, 2021).

2.1.3 Vantagens e Desvantagens de Veículos Não Tripulados

Os veículos terrestres possuem os desafios ambientais mais brandos, já que operam em terrenos variados, mas previsíveis. Chuvas intensas, neblina e terrenos acidentados podem comprometer a aderência e a percepção de sensores, mas tecnologias como LiDAR e câmeras térmicas auxiliam na navegação (THRUN, BURGARD, FOX, 2006).

Já os VANTs enfrentam desafios intermediários, pois sua operação depende de fatores meteorológicos como ventos, variações de pressão e temperatura, além de obstáculos aéreos. Sistemas como GPS e sensores de visão são essenciais, mas podem ser afetados por interferências eletromagnéticas e condições climáticas adversas (WANG, GARDNER, BOUSFIELD, 2017).

Por fim, os VSAs operam em um ambiente altamente complexo e imprevisível.

A densidade da água, correntes marítimas, variações de pressão e salinidade afetam diretamente sua estabilidade e sensores de navegação. Além disso, a comunicação por rádio é limitada devido à atenuação do sinal na água, tornando essencial o uso de tecnologias como sonar e navegação inercial (PAULL, SETO, LI, 2014).

2.1.4 Veículos Submarinos Autônomos

De um modo geral Veículos Aquáticos Não Tripulados são empregados em missões de exploração marítima, pesquisa científica e operações militares subaquáticas. Eles se dividem em Veículos de Superfície (figura 4) e Submarinos (VSAs), figura 5, o qual é o foco da pesquisa em questão, ou seja, um dos propósitos específicos deste trabalho é verificar a possibilidade de fabricar peças por MA com precisão que garantam a confiabilidade dos sistemas mecânicos de um VSA, e principalmente do sistema de navegação autônomo.



Figura 4 - Veículo de Superfície. Fonte: *CASTRO, 2009*

Atualmente, os VSAs estão sendo usados para uma variedade de tarefas, incluindo pesquisas oceanográficas, desminagem e coleta de dados batimétricos em ambientes marinhos e fluviais. A localização e a navegação precisas são essenciais para garantir a precisão dos dados coletados para essas aplicações (PAULL, SETO, LI, 2014).

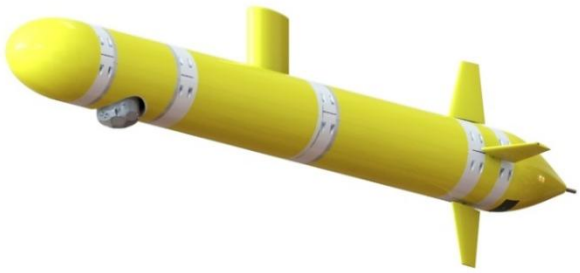


Figura 5 - Veículo Submarino Autônomo. Fonte: Autor.

Os VSAs fizeram uma verdadeira revolução no campo da pesquisa oceânica. Nas últimas duas décadas, os VSAs deixaram de ser equipamentos pesados e caros para a pesquisa acadêmica e passaram a ser uma ferramenta para solucionar uma ampla gama de problemas em muitos campos teóricos e práticos, incluindo os campos comercial e militar. Como resultado, os requisitos de capacidade de carga, as necessidades de recursos computacionais, os requisitos autônomos e acústicos aumentaram para esses dispositivos. Assim, o baixo custo e a versatilidade são muito importantes.

Portanto, o conhecimento das tendências no desenvolvimento do VSA é fundamental não apenas para nossa competitividade nessa área e para possibilitar a pesquisa atual do oceano, mas também para a defesa de nosso país, no mar e na zona costeira. Para identificar essas tendências, precisamos primeiro nos voltar para a história dos VSAs e descobrir como eles evoluíram e mudaram desde sua criação.

As aplicações militares da VSA se expandirão. O exército e a marinha modernos usam cada vez mais amplamente esses dispositivos autônomos que oferecem novas oportunidades e nos permitem resolver alguns problemas sem o envolvimento de pessoas e, consequentemente, sem um risco sério para elas. Desde a década de 90, os EUA vêm desenvolvendo VSAs para as seguintes tarefas:

- Reconhecimento hidroacústico e eletrônico;
- Detecção de submarinos, minas navais e outros objetos e sua destruição por meio de torpedos e mísseis transportados pelo VSA;
- Instalação de sensores e comunicações de minas navais;
- Fornecer comunicação entre dispositivos de detecção de submarinos e centros de comando em navios ou em terra.

De acordo com Gafurov, Klochkov (2015), a revisão da história dos AUVs permite entender como eles se desenvolveram desde o início até os dias atuais. As principais tendências de desenvolvimento de VSAs em um futuro próximo são:

- Uso de novos materiais e novos conceitos de design de VSAs;
- Aplicação de sistemas de propulsão radicalmente novos e baterias com alta capacitância;
- Aumento das aplicações de VSAs no setor militar;
- Miniaturização dos VSAs e aumento de sua capacidade computacional.

De um modo geral, os VSAs são projetados de forma modular, conforme pode ser observado na figura 6 a concepção de um VSA que está sendo produzido Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), compostos por diferentes seções interconectados, cada um desempenhando uma função essencial para a operação do veículo. Essa divisão facilita a organização dos sistemas, manutenção do veículo, permite maior flexibilidade, e capacidade de adaptação a diferentes missões. Podem-se dividir em Módulo Estrutural, Módulo de Propulsão, Módulo de Alimentação de Energia, Módulo de Sensores e Módulo de Navegação e Controle.

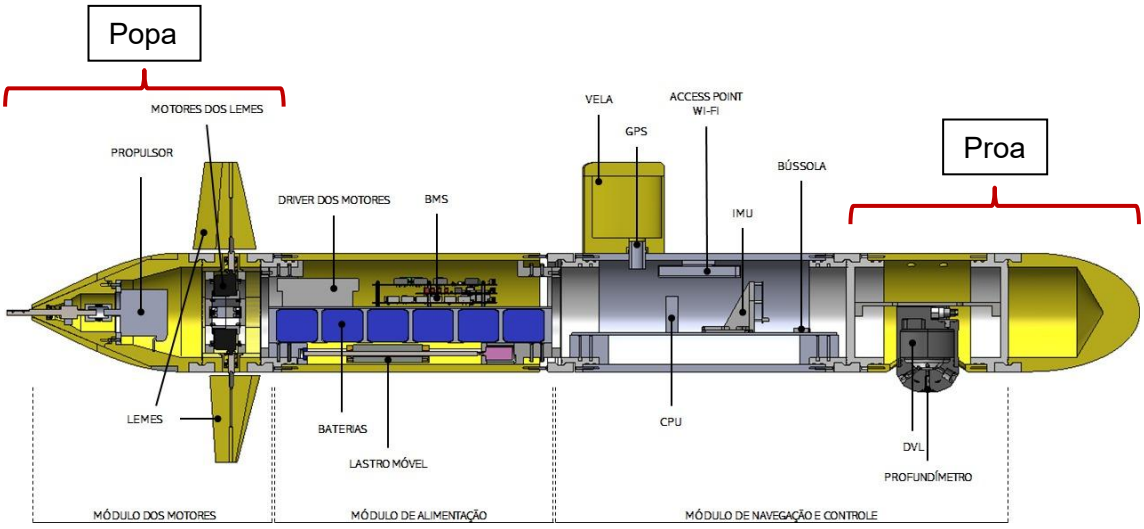


Figura 6: Vista de Corte Lateral de um VSA e seus respectivos módulos. Fonte: Autor.

O Módulo Estrutural compreende o casco e a carenagem do VSA. Ele é responsável por garantir a integridade mecânica do veículo e proteger seus componentes internos contra a pressão da água e impactos externos. Segundo Mendonça, *et al*. (2020), o uso de manufatura aditiva para a construção da estrutura reduz custos e permite maior flexibilidade no design. Bem como, o Módulo de Propulsão inclui motores, hélices e lemes, que possibilitam o deslocamento e a manobrabilidade do veículo, localizados na popa do veículo. A configuração da propulsão varia conforme

a missão do VSA, sendo que sistemas mais avançados utilizam propulsores vetoriais para maior controle de movimento (OLIVEIRA, 2017). Em alguns projetos, como o descrito por Azevedo (2013), a popa também pode conter sistemas adicionais, como módulos de comunicação acústica ou sistemas de liberação de cargas. A disposição dos componentes é importante para a estabilidade hidrodinâmica e eficiência energética do VSA.

O Módulo de Alimentação de Energia é responsável pelo fornecimento e gestão da energética necessária para o funcionamento do VSA, que neste caso utiliza baterias de íon-lítio, que são utilizadas devido à sua alta densidade energética. Estudos de Souza (2003) destacam a importância da gestão eficiente da energia para aumentar a autonomia do veículo, comumente situado na parte central da embarcação. A seção central do VSA é destinada aos sistemas de controle, processamento e armazenamento de dados. Nessa área, encontram-se o computador de bordo, módulos de comunicação e, frequentemente, compartimentos para baterias. A modularidade dessa seção permite a integração de diferentes cargas úteis (payloads), adaptando o veículo para diversas missões. No estudo de Oliveira (2017), é destacado o uso de uma arquitetura modular na parte central para facilitar a substituição e atualização de componentes eletrônicos e de controle.

Adicionalmente, o Módulo dos Sensores compreende dispositivos como sonar, câmeras, sensores de profundidade e sensores de navegação inercial que geralmente estão instalados na proa do veículo, por exemplo, no projeto do VSA SeaCon, desenvolvido pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em colaboração com a Marinha Portuguesa, a proa é equipada com sensores que auxiliam na navegação autônoma e na execução de missões específicas. Esses sensores permitem a coleta de dados ambientais e a localização precisa do VSA. Grotkowsky (2012) enfatiza que a fusão de dados de diferentes sensores pode melhorar a precisão da navegação autônoma.

E por fim, o Módulo de Controle e Navegação abriga o computador de bordo e os sistemas de comunicação, essenciais para o processamento de dados e a tomada de decisões. Os VSAs utilizam redes CAN *(Controller Area Network*) e protocolos de comunicação submarina para a troca de informações entre os módulos (MENDONÇA, *et al.* 2020).

A divisão em proa, parte central e popa facilita a manutenção, upgrades e personalização para missões específicas. Estudos como o de Azevedo (2013) e Oliveira (2017) ressaltam a importância dessa abordagem para o desenvolvimento eficiente e

eficaz de VSAs. Além da flexibilidade no design e na aplicação dos veículos, a configuração modular dos VSAs permite que a construção dos módulos utilize diferentes materiais e diferentes processos de fabricação, ou seja, a escolha dos materiais e dos processos de fabricação dos módulos dos VSAs pode considerar as exigências específicas de cada aplicação. Para módulos que demandam alta precisão, por exemplo, é essencial utilizar materiais com baixa deformação e processos de fabricação que garantam tolerâncias rigorosas. Se a seção for alagada, os materiais precisam resistir à corrosão e à influência da salinidade, enquanto módulos estanques exigem vedação eficiente para proteger componentes sensíveis. Além disso, a decisão sobre a recuperação ou não do módulo, impacta na escolha dos materiais e no design estrutural, influenciando fatores como durabilidade e reutilização.

2.2. Sistema de Navegação

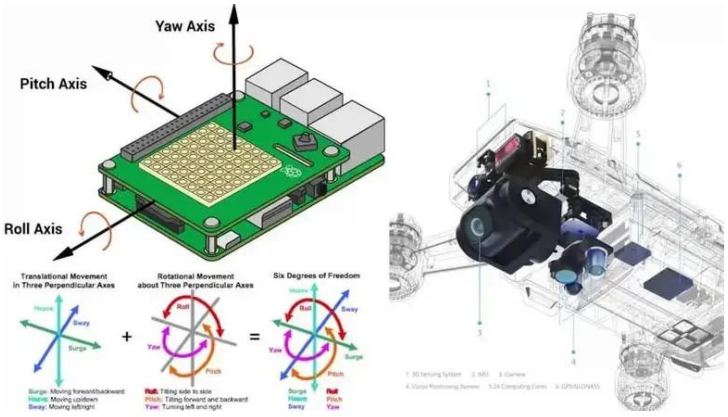
A navegação e localização de VSAs é um problema desafiador devido principalmente à rápida atenuação dos sinais de frequência mais alta e à natureza não estruturada do ambiente submarino. Acima da água, a maioria dos sistemas autônomos depende de comunicações por rádio ou espectro espalhado e posicionamento global (GPS). No entanto, debaixo d'água, esses sinais se propagam apenas por curtas distâncias, e os sensores e as comunicações baseados em acústica têm melhor desempenho. Com isso, o resultado é que o erro limitado e a navegação precisa para VSAs está se tornando possível com as melhorias em sensores (como as Unidades de Medição Inercial de baixo custo), o desenvolvimento de algoritmos de fusão de sensores e a aplicação de tecnologias como SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) têm contribuído para aprimorar a precisão da navegação, ao mesmo tempo que reduzem os custos operacionais e de hardware (PAULL, SETO, LI, 2014).

Apesar destes desafios significativos, as investidas na navegação e localização de VSAs têm se propagado nos últimos dez anos. O campo está no meio de uma mudança de paradigma de tecnologias antigas, como linha de base longa (LBL) e ultracurta linha de base (USBL), que requer pré-implantação e localização infraestrutura, em direção a abordagens de sistemas multiagentes dinâmicos que permitem implantação rápida e flexibilidade com o mínimo infraestrutura. Além disso, localização e mapeamento simultâneos (SLAM) técnicas desenvolvidas para robótica acima do solo aplicações estão sendo cada vez mais aplicadas a sistemas subaquáticos (PAULL, SETO, LI, 2014).

2.2.1 Sistemas Inercias

A Unidade de Medição Inercial *(Inertial Measurement Units - IMU)*, observada na figura 7, é composta de um giroscópio, um acelerômetro e um magnetômetro, tem a função de localizar o veículo em relação à posição inicial. Ela utiliza o campo magnético da Terra como valores de referência para medir a alteração na posição angular durante o movimento do veículo. Qualquer distúrbio no campo magnético faria com que a IMU gerasse erros nos valores fornecidos como saída (JAIN, *et al.* 2021).

A estimativa inicial do desvio de rota dos veículos autônomos deve incluir contribuições de erro tanto da IMU, quanto do sistema mecânico que a mantém no posicionamento requisitado durante a operação (ZONA SPASIAL, 2019).



(a) (b)

Figura 7 – (a) Unidade de Medição Inercial (UMI) (b) Disposição da UMI em um drone. Fonte: *Zona Spasial, 2019*

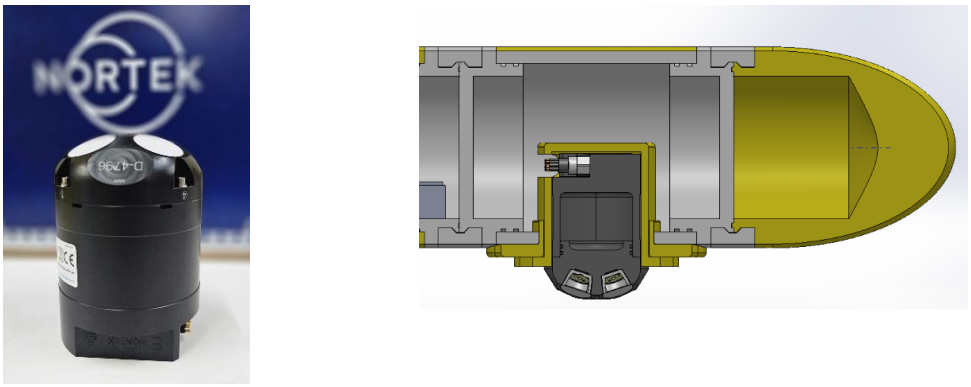
Compreender o impacto que estes erros têm nas principais funções de um sistema de navegação ajuda a estabelecer metas de desempenho relevantes que evitam sobrecarregar o problema, ao mesmo tempo que gere o risco de perder desempenho chave e compromissos de custos (LOONEY, 2015).

2.2.2 DVL / NUCLEUS.

O *Doppler Velocity Logger (DVL)* é um instrumento acústico utilizado para medir a velocidade de veículos subaquáticos em relação ao leito marinho. Ele emprega o efeito Doppler para calcular a velocidade com base no desvio de frequência das ondas

sonoras refletidas. Além disso, o DVL pode fornecer informações sobre a altitude do veículo em relação ao fundo do mar (KONGSBERG, 2020).

Um exemplo é o *DVL* 500 da *Nortek,* mostrado na figura 8, que opera a uma frequência de 500 kHz e é projetado para profundidades de até 300 metros. Este dispositivo oferece rastreamento de fundo em um intervalo de 0,1 a 200 metros e é amplamente utilizado em veículos submarinos autônomos (VSAs) e veículos operados remotamente (*ROVs)* para navegação precisa (NORTEK, 2022).



(a) (b)

Figura 8 – DVL (a) marca Nortek (b) Montagem do DVL no VSA. Fonte: Autor.

Outro exemplo é o *DVL* desenvolvido pela *Water Linked*, reconhecido por seu design compacto e desempenho eficiente. Este *DVL* é projetado para ser acessível e fácil de usar, mantendo especificações de alto desempenho. Ele é adequado para uma variedade de plataformas subaquáticas, incluindo *ROVs*, VSAs e aplicações de mergulho, oferecendo uma distância mínima de operação de 5 cm em relação ao leito marinho (LINK, 2023).

Em termos de aplicações práticas, os *DVLs* são essenciais para a navegação precisa de veículos subaquáticos, permitindo operações estáveis e controladas, mesmo em condições desafiadoras. Eles são integrados a sistemas de navegação inercial (INS) para fornecer dados de velocidade e posição, fundamentais para missões de longa duração e levantamentos hidrográficos detalhados (PAULL, SETO, LI, 2014).

Além disso, os *DVLs* são utilizados em pesquisas hidrológicas para medir a vazão de rios e correntes. Estudos demonstraram que perfiladores acústicos *Doppler*, como o *ADCP* e o *Qliner,* apresentam incertezas padrão, em relação às médias das medições, indicando a validade do uso desses dispositivos para a expansão de redes fluviométricas e geração de dados hidrológicos (Bjerknes, Wahl, 2021).

No processo de montagem mecânica, como o *DVL* opera em ambientes subaquáticos, é crucial assegurar que a unidade esteja devidamente selada contra a entrada de água e protegida contra danos físicos. Isso inclui o uso de carcaças resistentes à pressão e materiais anticorrosão para prolongar a vida útil do equipamento. Outra informação importante é que *DVL* é integrado ao sistema de navegação inercial do VSA em conjunto com a *IMU*, para fornecer dados precisos de velocidade e posição. Estes equipamentos precisam estar alinhados de acordo com as respectivas especificações dos fabricantes. Esta integração é fundamental para uma navegação autônoma precisa do veículo (SONARDYNE, 2020).

Em ambientes de simulação, como o Gazebo (simulador de robótica 3D de código aberto), existem plugins que emulam o comportamento de um DVL para testes e desenvolvimento de veículos subaquáticos autônomos. O *UUV Simulator*, por exemplo, oferece um plugin que interage com o mundo simulado e publica mensagens *ROS* correspondentes às leituras percebidas, permitindo a avaliação de algoritmos de navegação em um ambiente controlado (Brisset *et al*., 2018).

2.3 Manufatura Aditiva (MA)

A MA, de acordo com a norma ASTM F2792, é descrita como um “processo de união de materiais para formar objetos a partir de dados de um modelo 3D, normalmente camada por camada, diferentemente dos métodos tradicionais de manufatura subtrativa” (DUARTE, 2024).

O desenvolvimento constante e popularização das técnicas de fabricação promove a criação de novos termos ao longo do tempo. Quando se trata de MA, outros três termos costumam ser usados como sinônimos: impressão 3D, fabricação digital e prototipagem rápida. O termo popularmente conhecido como impressão 3D é de fato um sinônimo de MA. Já a fabricação digital é um termo usado em referência às máquinas que utilizam *CNC* para produção em pequena ou grande escala, como impressoras 3D, máquinas de corte a laser e usinagem. Logo a prototipagem rápida é um termo que designa o conjunto de técnicas para a fabricação de objetos auxiliados por programas *CAD (Computer Aided Design*). Assim, o termo fabricação digital é o termo mais geral que enquadra tanto o termo prototipagem rápida quanto impressão 3D, que é o termo mais específico e pertence a todos os grupos simultaneamente (NGO, 2018) e (LEE, NA, CHUA, 2017).

Embora o termo MA exemplifique uma categoria única de fabricação, a

Organização Internacional de Normalização (ISO) e a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) reconhecem que esse processo de fabricação pode ser segmentado em sete categorias. Essas categorias são: extrusão de material *(material extrusion)*, fotopolimerização *(vat photopolymerization)*, fusão de leito de pó *(powder bed fusion),* jateamento de material *(material jetting)*, jateamento de ligante (*bonding agent spraying)*, deposição de energia direcionada *(directed energy deposition)* e laminação de folhas *(sheet lamination)* (BHUVANESH KUMAR, SATHIYA, 2021). Na figura 9, é possível observar as sete categorias da MA e seus subprocessos.

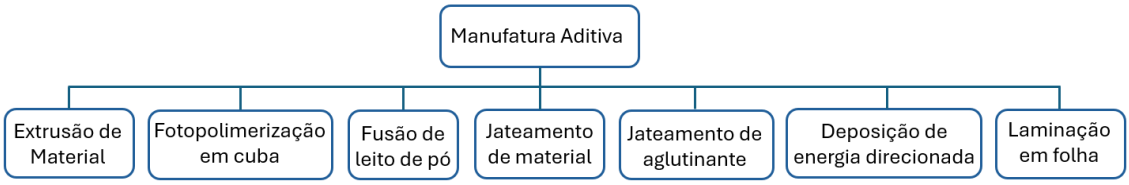


Figura 9 – Categorias de impressão 3D. Fonte: Autor

De uma forma geral e mais detalhada, as etapas do processo compreendem (VOLPATO, *et al.,* 2017):

1. a modelagem tridimensional, gerando-se um modelo geométrico 3D da peça, (por exemplo, em um sistema CAD);
2. a obtenção do modelo geométrico 3D num formato específico para AM, geralmente representado por uma malha de triângulos, em um padrão adequado (por exemplo, *Stereolithography (STL), Additive Manufacturing Format (AMF)*, ou outro).
3. o planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material);
4. a fabricação da peça no equipamento de MA; e
5. o pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia (pode envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos tradicionais de usinagem por remoção).

O fluxo do processo de impressão 3D, figura 10, ocorre a partir da criação de um modelo tridimensional através de um *software CAD (Computer-Aided-Design)* (GORNI, 2001). Este modelo é convertido para um arquivo em formato de estereolitografia *(STL)*, que simplifica o modelo original para um conjunto de elementos triangulares.

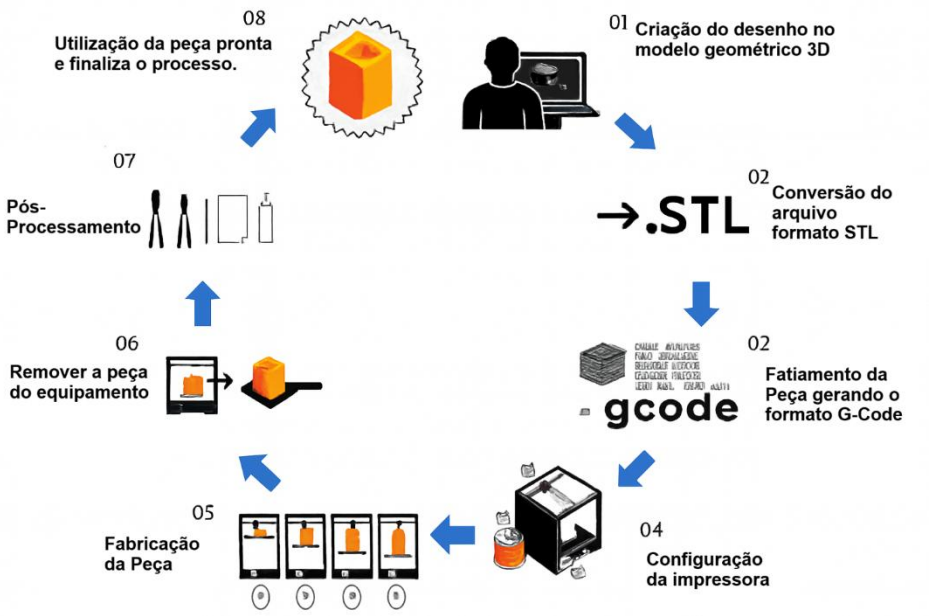


Figura 10 - Etapas do processo de impressão 3D. Fonte: *SANTOS; et al., 2021*

O arquivo *STL* é então dividido horizontalmente (ou “fatiado”) por meio de um software de fatiamento, em diversas camadas, figura 11, representando os contornos bidimensionais, que quando depositadas umas sobre as outras através do processo denominado *Fused Filament Fabrication (FFF)* formam o modelo tridimensional original Ahn, *et al.*, 2002.

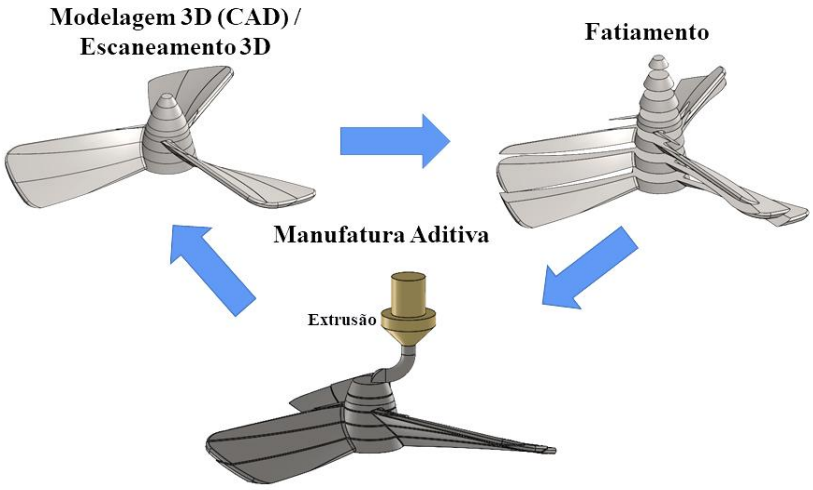


Figura 11: Conceito básico do processo de fatiamento. Fonte: Autor.

Com isso, o processo de fabricação pode ser resumido da seguinte maneira para todas elas:

1. Projeto e modelo 3D em um programa *CAD*;
2. Transformação do modelo *CAD* em arquivo no formato *STL*;

3. Determinação dos parâmetros de impressão e fatiamento do arquivo em um software que prepara o *G-code*;
4. Impressão 3D;
5. Pós-processamento, se necessário.

Inicialmente, a MA era usada apenas para fabricação de protótipos, mas devido às melhorias e confiança no desempenho dessa tecnologia, hoje ela é usada também na criação de produtos. Algumas vantagens que impulsionaram seu uso foram liberdade de *design*, economia de tempo e custos eliminando muitas etapas necessárias nos processos convencionais, possibilidade de criar geometrias complexas em uma etapa única e simples, gerenciamento simplificado da cadeia de suprimentos, possibilidade de personalização, economia de material e impacto ambiental reduzido (ZHENG, *et al.*, 2021). Adicionalmente, Syrlybayev, *et al.* (2021) relata que, em muitos casos, também é possível se obter produtos impressos por MA com acabamento e estruturas confiáveis, de modo que possam ser utilizados como produto final, o que ratifica a importância de análises estruturais e dimensionais de peças fabricadas por MA.

Existem algumas opções para gerar os modelos tridimensionais a serem impressos, as quais é possível destacar a digitalização 3D, a modelagem procedural, e bem como na forma de software de modelagem *CAD*, comumente utilizados por engenheiros e designers em projetos e desenvolvimento de peças para diversas aplicações, desde protótipos até produtos finais. Além disso, técnicas como otimização topológica e simulação estrutural garantem melhor desempenho das peças. Com a evolução dos materiais e da impressão 3D, a modelagem digital se torna cada vez mais crucial para inovação e eficiência na indústria moderna.

A extrusão de material é um processo na impressão 3D por fusão e deposição de material (*FFF*), no qual um filamento termoplástico é aquecido e depositado camada por camada para formar um objeto tridimensional. Dentre os diferentes processos de MA, a extrusão de material destaca-se como uma das técnicas mais amplamente utilizadas devido à sua versatilidade, custo acessível e aplicabilidade em materiais poliméricos, cerâmicos e até metálicos (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

Deste modo, para melhor compreender os desafios relacionados aos problemas de fabricação na MA, nos próximos subtópicos serão abordadas informações referentes à modelagem 3D e a geração do arquivo *STL*, à extrusão de materiais e algumas possíveis falhas que podem ocorrer durante o processo, bem como alguns casos de sucessos já obtidos em aplicações alusivas a peças fabricadas por MA para pronto-uso, utilizadas no VSA.

2.3.1 Modelagem 3D e Geração do STL

A modelagem 3D é uma técnica essencial no desenvolvimento de produtos, permitindo a criação digital de objetos tridimensionais com alta precisão. Esse processo utiliza softwares especializados, como Autodesk Fusion 360, SolidWorks e Blender, que oferecem ferramentas avançadas para esboço, extrusão, revolução e parametrização de modelos (CHUA, LEONG, LIM, 2010). Após a modelagem, um dos formatos mais utilizados para a impressão 3D é o *STL (Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language),* que representa a geometria do objeto por meio de uma malha de triângulos, sem informações de cores, texturas ou propriedades físicas (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Um exemplo de conversão do software *SolidWorks*, conforme figura 12.

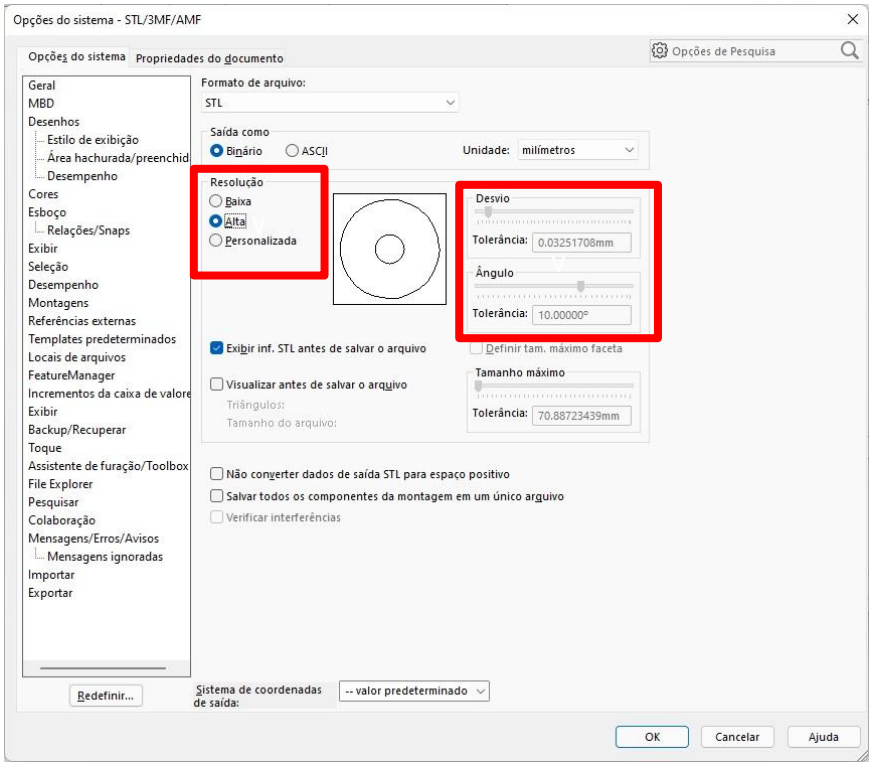


Figura 12: Configuração do SolidWorks para Resolução de STL em alta resolução.
Fonte: Autor.

Esse formato é amplamente compatível com a maioria das impressoras 3D e softwares *slicers,* como *Cura* e *PrusaSlicer,* responsáveis por converter o modelo digital em camadas para fabricação (NGO, 2018). A qualidade do STL depende da resolução da malha e da fidelidade do arquivo exportado, podendo influenciar diretamente na precisão da peça final. Além disso, técnicas como a redução de polígonos e a verificação

de erros na malha são fundamentais para evitar defeitos na impressão (BÁRTOLO, 2011). Dessa forma, a modelagem 3D e a geração de STL são etapas críticas para garantir eficiência e precisão na manufatura digital.

No *SolidWorks*, a exportação para STL permite ajustes como resolução da malha e tolerância de desvio, impactando diretamente na precisão da peça impressa (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Definir corretamente esses parâmetros na resolução evita distorções e garante maior fidelidade ao modelo original (CHUA, LEONG, LIM, 2010). Além disso, a escolha adequada entre malhas finas ou grosseiras influencia o tempo de processamento e a qualidade final da impressão 3D (NGO, 2018). Nas figuras 13, 14 e 15, é possível observar um exemplo da influência da resolução da malha em modelos 3D convertidos em formatos STL, nas dimensões nominais da modelagem tridimensional, no software *SolidWorks,* de um disco com 50 milímetros de diâmetro e 5 milímetros de altura.

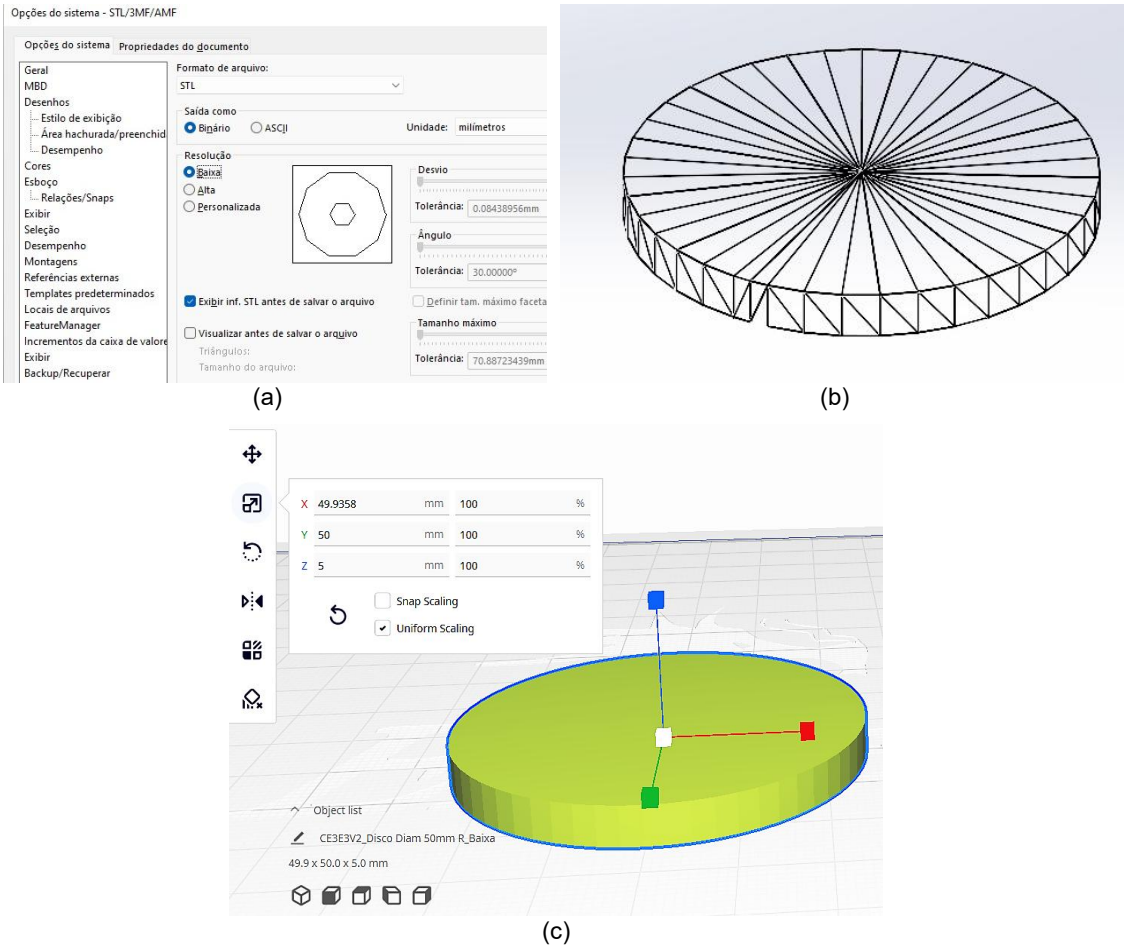


Figura 13 – Conversão em STL Resolução Padrão Baixa - (a) Configuração dos parâmetros (b) Visualização da Malha (c) Identificação das dimensões. Fonte: Autor.

É possível observar na Figura 13 (c), que houve perda dimensional a nível centesimal do diâmetro na direção x durante a conversão na qual a resolução foi configurada como padrão Baixa. Entretanto, mesmo configurando o parâmetro resolução para o padrão Alta, Figura 14 (a), essa perda dimensional na direção x continuou existindo, Figura 14 (b).

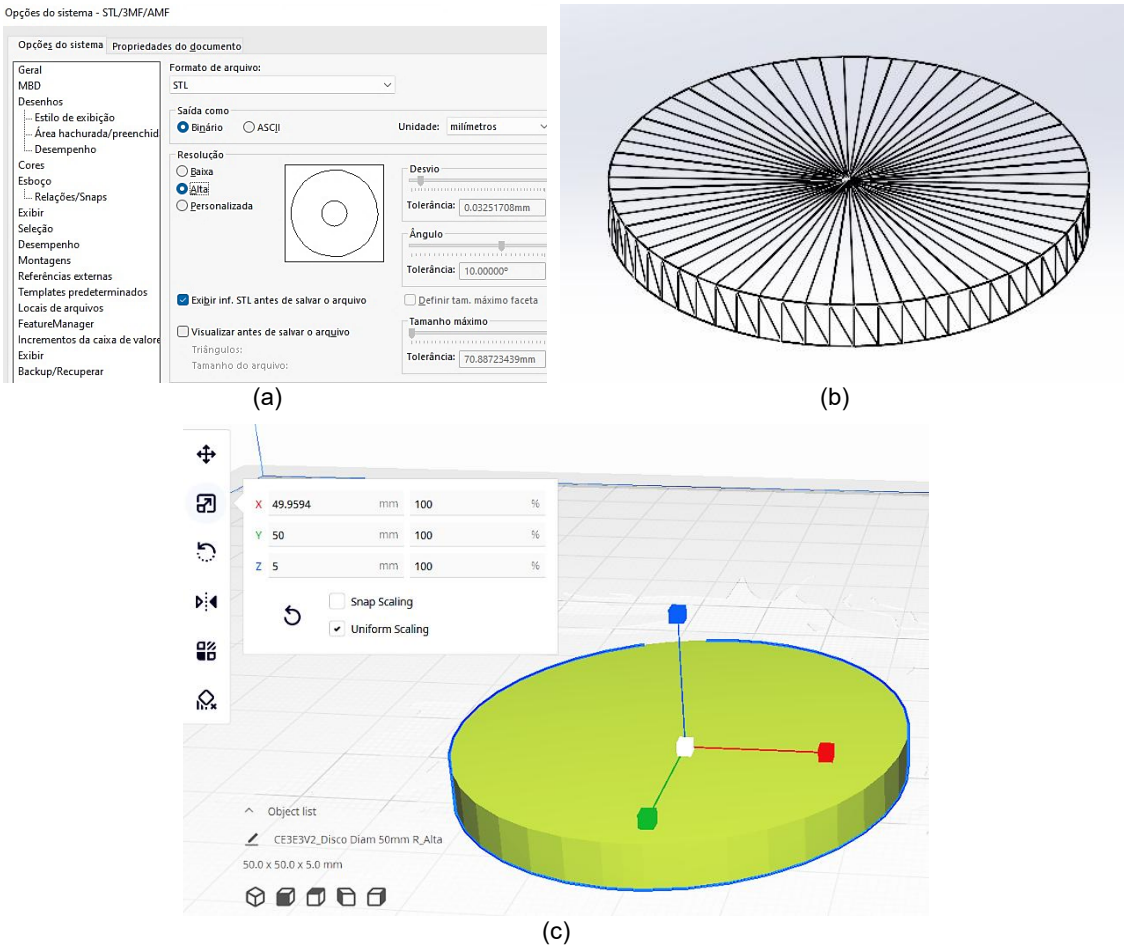
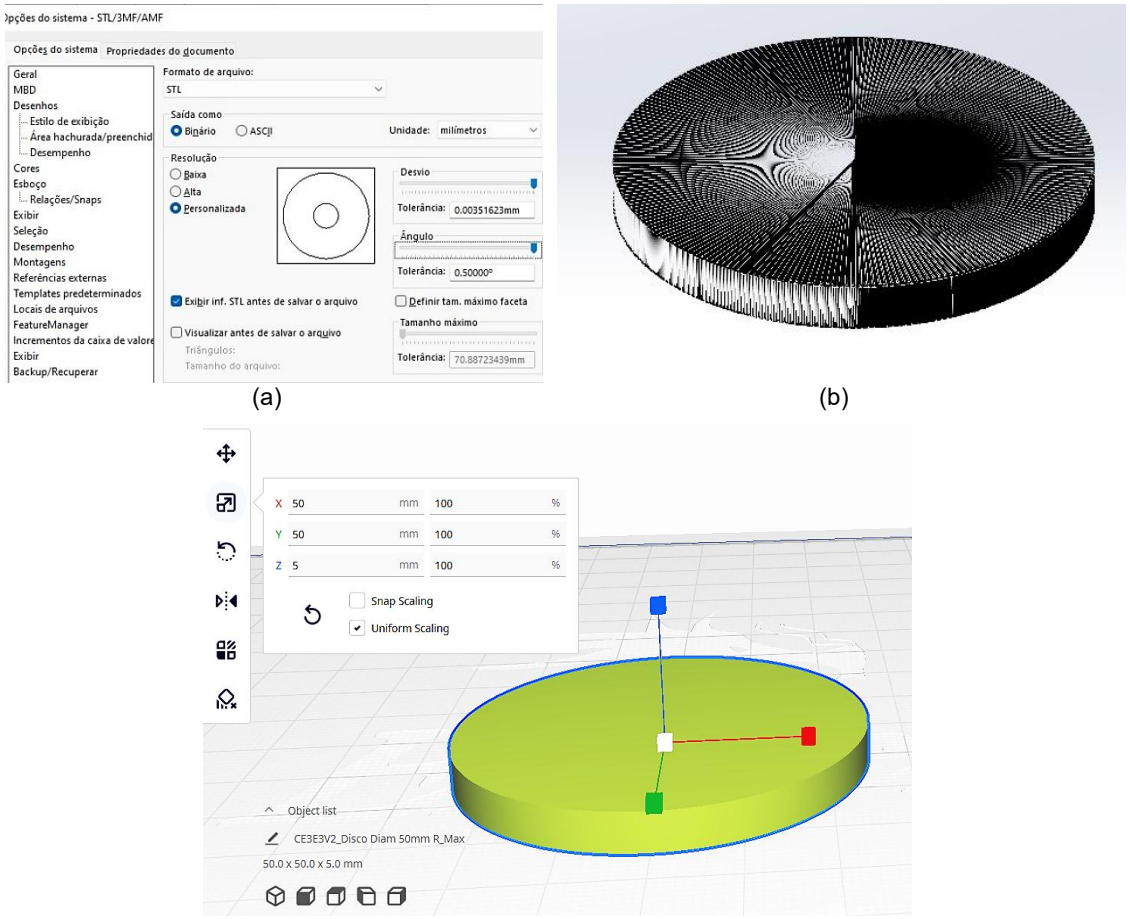


Figura 14 – Conversão em STL Resolução Padrão Alta - (a) Configuração doa Parâmetros (b) Visualização da Malha (c) Identificação das dimensões. Fonte: Autor.

Assim sendo nas figuras 15(a) e 15(c), é possível observar que essa perda, em relação a conversão do STL em relação a resolução baixa (desvio com tolerância de 0,064 mm e ângulo com tolerância de 10º) e a resolução alta (desvio com tolerância de 0,0325 mm e ângulo com tolerância de 30º), não se caracteriza quando a conversão é feita com a configuração “Personalizada” em máxima resolução, que são valores máximos permitidos pelo SoliWorks, com desvio máximo com tolerância de 0,00351623 mm e ângulo com tolerância máxima de 0,5º.



(a) (b)

(c)

Figura 15 – Conversão em STL Resolução Personalizada em Máxima – (a) Configuração dos parâmetros (b) Visualização da Malha (c) Identificação das dimensões. Fonte: Autor.

Apesar das tolerâncias adotadas como referência para esta dissertação estarem na casa decimal, preferiu-se considerar prudente utilizar sempre a configuração Personalizada durante a conversão dos modelos tridimensionais dos Corpos de Prova (CPs) em arquivo STL.

2.3.2. Extrusão de Material

A MA por extrusão de material ainda enfrenta desafios relacionados à precisão dimensional, aderência entre camadas e resistência mecânica dos produtos finais (GEBHARDT, 2019). Apesar de suas vantagens, a qualidade das peças produzidas por extrusão de material depende diretamente dos parâmetros de impressão e da escolha do filamento.

2.3.2.1. Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão 3D desempenham um papel importante na qualidade, precisão dimensional e resistência mecânica das peças fabricadas por manufatura aditiva. Fatores como temperatura do bico extrusor, velocidade de impressão, taxa de extrusão, umidade do ambiente, altura de camada e taxa de preenchimento influenciam diretamente a adesão entre camadas, precisão dimensional e o acabamento superficial (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Além disso, ajustes inadequados podem causar defeitos, como delaminação, empenamento ou superfícies rugosas (TURNER, STRONG, GOLD, 2014). A otimização desses parâmetros é essencial para obter peças com alta fidelidade ao modelo digital, reduzindo desperdícios e melhorando a eficiência do processo (RANE, RUDRAPATNA, 2019).

Normalmente, os objetos impressos em 3D podem fornecer superfícies lisas com dimensões precisas usando a maioria das impressoras 3D baratas disponíveis no mercado. No entanto, o fabricante precisa considerar cuidadosamente os parâmetros de impressão envolvidos em cada objeto/peça para serem produzidos com boa qualidade (por exemplo, densidade de preenchimento, espessura da camada, temperatura definida do bico extrusor, ângulo de deposição, entre outros). Uma quantidade considerável de pesquisas relatadas tentou otimizar os parâmetros relacionados à produção da modelagem de deposição por fusão (FFF) para imprimir peças de alta qualidade (ABEYKOON, SRI-AMPHORN, FERNANDO, 2020).

Em um estudo detalhado, Zhou, *et al.* (2023) analisaram a influência da temperatura do bico e da mesa, bem como da orientação de construção, na rugosidade da superfície de peças impressas em PLA. Os pesquisadores concluíram que a temperatura do bico é um parâmetro crítico, com temperaturas mais elevadas (220°C) reduzindo a viscosidade do material e permitindo um fluxo mais suave, o que minimiza as irregularidades e melhora o acabamento da superfície. Por outro lado, a temperatura da mesa (60°C) mostrou-se essencial para garantir uma boa adesão da primeira camada e evitar deformações, o que indiretamente contribui para a qualidade geral da peça. Além disso, eles observaram que a orientação de construção (a forma como a peça é posicionada na plataforma de impressão) tem um impacto direto, com orientações que minimizam os degraus de camada resultando em superfícies mais lisas.

Nesse caso Wang, *et al.* (2021) investigaram como a espessura da camada, a densidade de preenchimento e a velocidade de impressão afetam as propriedades mecânicas de peças impressas em FFF. Seus resultados revelaram que a densidade

de preenchimento tem a maior influência na resistência à tração e à flexão, com valores mais altos resultando em peças mais fortes. A espessura da camada também demonstrou ser um fator significativo, onde camadas mais finas (0,1 mm) levaram a uma melhor adesão entre as camadas e, consequentemente, a uma maior resistência, em comparação com camadas mais espessas. Já a velocidade de impressão mostrou uma influência menos pronunciada, embora velocidades moderadas (entre 60 e 80 mm/s) tenham proporcionado o melhor equilíbrio entre resistência e tempo de produção.

Em outra vertente, Nuñez, *et al.* (2015) estudaram a precisão dimensional, a planicidade e a textura da superfície de estruturas de ABS impressas. Eles descobriram que a espessura da camada e a densidade de preenchimento influenciam o acabamento da superfície e a precisão dimensional das peças. Os resultados mostraram que baixas espessuras de camada e altas densidades de preenchimento foram favoráveis para um melhor acabamento da superfície. Ao mesmo tempo, altas espessuras de camada e densidades de preenchimento tendem a melhorar a precisão dimensional.

2.3.2.2. Filamentos

Os filamentos de MA são materiais termoplásticos utilizados no processo de impressão 3D por fusão e deposição de material (FFF). Esses filamentos são aquecidos e extrudados camada por camada para formar um objeto tridimensional, sendo amplamente utilizados na prototipagem, produção de peças funcionais e fabricação personalizada (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Os materiais mais comuns incluem PLA (ácido polilático), ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e PETG (polietileno tereftalato glicol), cada um com propriedades mecânicas e térmicas distintas (TYMRAK, KREIGER, PEARCE, 2014). Além desses, existem filamentos técnicos, como os compostos com fibra de carbono e os de materiais flexíveis, como TPU (poliuretano termoplástico), que oferecem características diferenciadas para aplicações específicas (WANG, GARDNER, BOUSFIELD, 2017). A escolha do filamento ideal depende das necessidades da peça final, incluindo resistência mecânica, temperatura de operação e acabamento superficial desejado.

O uso de filamentos na impressão 3D apresenta vantagens e desafios que devem ser considerados no processo de MA. Entre os principais benefícios, destaca-se a acessibilidade dos materiais, a diversidade de opções disponíveis e a facilidade de uso das impressoras *FFF*, tornando essa tecnologia amplamente acessível para aplicações industriais e domésticas (RANE, RUDRAPATNA, 2019). No entanto, há

limitações, como o efeito *warping* (deformação devido ao resfriamento irregular), a necessidade de calibração precisa da impressora e a resistência mecânica inferior em comparação com métodos tradicionais de fabricação (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Além disso, a qualidade do filamento pode influenciar diretamente na adesão entre camadas e na estabilidade dimensional da peça final, sendo essencial o controle de umidade e armazenamento adequado dos materiais, pois a absorção de umidade pode comprometer a extrusão e gerar superfícies rugosas ou frágeis (TYMRAK, KREIGER, PEARCE, 2014).

A precisão dimensional das peças impressas em 3D depende de diversos fatores, incluindo a qualidade do filamento utilizado. Variações no diâmetro do filamento podem levar a extrusão inconsistente, resultando em imprecisões dimensionais nas peças fabricadas (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016). Além disso, a composição do material influencia a contração térmica e a estabilidade dimensional da peça durante o resfriamento. Materiais como ABS, por exemplo, apresentam maior retração térmica, o que pode causar empenamento e distorções geométricas se a temperatura da mesa aquecida e do ambiente não forem bem controladas (TURNER, STRONG, GOLD, 2014). Já o PLA, por possuir menor contração térmica, tende a produzir peças com maior precisão dimensional e menos deformações (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Dessa forma, a escolha do filamento adequado e o controle das condições de impressão são fundamentais para garantir a fidelidade do modelo impresso em relação ao projeto original. Como pode ser observado na figura 16 (a) representa do filamento PLA e a (b) o filamento ABS.



(a) (b)

Figura 16: a) Filamento PLA b) Filamento ABS. Fonte: Autor.

Pesquisas com base em materiais como PLA e ABS são interessantes por serem facilmente encontrados no mercado, de custo acessível, com observância em diversas aplicações (BERARDI, *et al.,* 2024).

2.3.3. Problemas na Fabricação

A fabricação de peças em impressão 3D pode apresentar diversos problemas que comprometem a qualidade, precisão dimensional e resistência dos modelos. Entre os mais comuns, destaca-se a “pata de elefante”, que ocorre devido ao superaquecimento da base da peça, fazendo com que as camadas inferiores, que estão mais próximas da mesa aquecida se expandam mais do que o esperado, podendo resultar em uma base irregular (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016). A subextrusão acontece quando a quantidade de filamento depositada é insuficiente, gerando camadas com falhas ou lacunas, enquanto a superextrusão ocorre pelo excesso de material, formando superfícies ásperas e imprecisas (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

Outro problema recorrente é o *ghosting* (ou *ringing*), caracterizado pela repetição indesejada de contornos ao longo da peça, causada por vibrações excessivas da impressora, especialmente em altas velocidades de impressão. A delaminação, por sua vez, ocorre quando as camadas não aderem corretamente umas às outras, podendo levar à separação total da peça, sendo comum em materiais como ABS devido à sua alta contração térmica (TURNER, STRONG, GOLD, 2014). Além disso, problemas como o warping (empenamento das extremidades da peça) e a presença de *stringing* (filamentos finos indesejados entre partes da impressão) podem comprometer significativamente a funcionalidade e o acabamento da peça final. Ajustes precisos nos parâmetros de impressão, como temperatura, velocidade e taxa de resfriamento, são essenciais para minimizar esses problemas e garantir um resultado de alta qualidade.

A seguir serão apresentadas algumas informações sobre problemas que podem influenciar na análise dimensional e que devem ser observadas para que não afetem as peças produzidas.

2.3.3.1. Subextrusão

A subextrusão é um problema muito comum na impressão 3D que ocorre quando se tem baixa quantia de filamento extrudado, que pode ser visto na figura 17. Isso

geralmente leva a vazios, lacunas, camadas ausentes ou pontos em que o filamento depositado está faltando. Aumentar o fluxo para compensar a falta de material não é uma alternativa aconselhável, visto que não se justifica elevar o fluxo de material extrudado quando a passagem do filamento se encontra restrita.

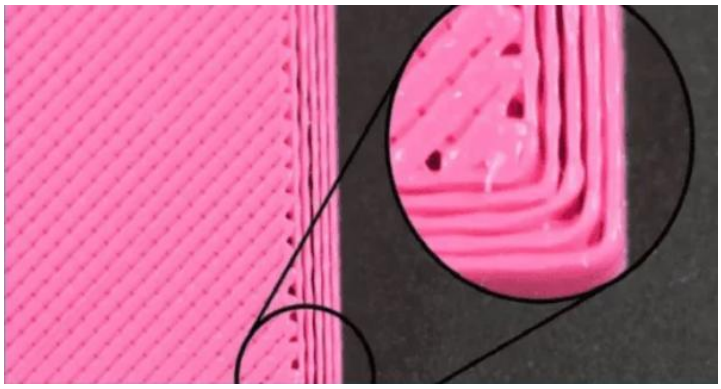


Figura 17: Degradação em função subextrusão. Fonte: *PORTELA , 2020*

Quanto mais rápida for a impressão, menos tempo o filamento terá para se aquecer antes de ser empurrado pelo bocal de extrusão, podendo causar o seu entupimento (3DLAB, 2021).

2.3.3.2. Superextrusão

A superextrusão é principalmente o resultado de uma calibração de extrusão não realizada ou sem procedimentos adequados. Pode ser observado na figura 18, que esse processo ocorre quando existe extrusão excessiva de material, o qual pode afetar a qualidade das impressões. A imprecisão dimensional, a queda de camadas, o vazamento, as bolhas e até mesmo o entupimento podem resultar de uma impressora com excesso de extrusão. Algumas formas para resolver esse problema são as seguintes: alterar o multiplicador de extrusão para um valor mais baixo e diminuir a temperatura de impressão (MAGMA, 2019).

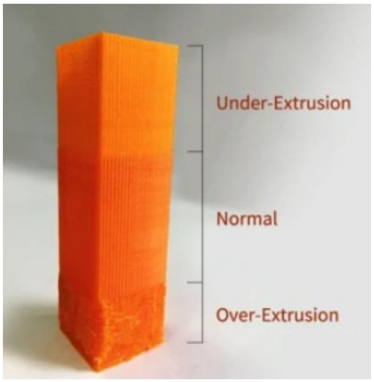


Figura 18: Defeito em razão de superextrusão. Fonte: *MAGMA3D, 2019*

A falta de aderência entre o material depositado e a plataforma de construção (cama da impressora) pode ocorrer devido a ajustes mecânicos – distância incorreta entre a cama e o bico, ou nivelamento da plataforma, mas também devido à falta de afinidade do extrudado com a superfície de impressão, temperaturas de base, presença de sujeira, falta de adesivos, entre outros (BITFAB, 2022). Quando as impressões 3D não permanecem no lugar na placa de construção, resultados desastrosos podem ser obtidos, normalmente os fabricantes usam vários tipos de superfícies de impressão 3D para ajudar diferentes materiais a aderir à placa durante a impressão. Mais comumente, as impressoras 3D usam alumínio, aço inoxidável, vidro, *BuildTak*, fita *Kapton*, fita *PET*, fita adesiva ou filme PEI; mas não há um único tipo de base que funcione melhor para a adesão de todos os tipos de filamentos (BUILDTAK, 2023).

2.3.3.3 Pata de Elefante

A “pata de elefante” consiste na expansão no plano horizontal das primeiras camadas das peças, que pode ser vista na figura 19, sendo que as principais causas podem ser devido ao fato de o bico estar muito próximo da camada ou a temperatura da mesa estar muito alta. Para tentar resolver esse problema, pode-se nivelar a mesa de impressão e ajustando o bico. Às vezes, esse defeito é simplesmente o resultado de uma plataforma de construção irregular ou de uma altura incorreta do bico.

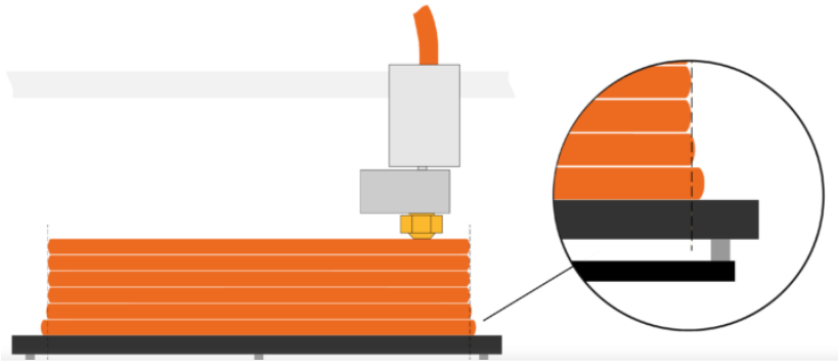


Figura 19: Sobre material em função da Pata de Elefante. Fonte: *3D Natives, 2023*

Esses problemas fazem com que a primeira camada seja esmagada, forçando o material já impresso a inchar. Uma maneira de solucioná-lo é diminuir a temperatura da mesa: reduza a temperatura da mesa em intervalos de 5ºC até que a impressão seja bem-sucedida (ALL3DP, 2021).

2.3.3.4 Empenamento / Warping

O *warping* é um dos principais desafios na manufatura aditiva, especialmente na impressão 3D por deposição de filamento (FFF). Esse fenômeno, como pode ser observado na figura 20, ocorre devido à contração térmica desigual das camadas do material durante o resfriamento, resultando em deformações e descolamento da peça da mesa de impressão (TURNER, STRONG, GOLD, 2014).

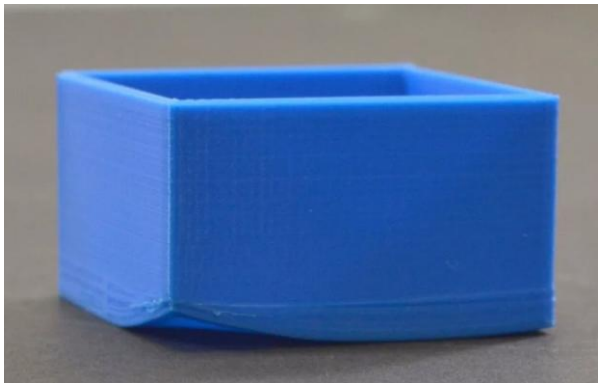


Figura 20: Imperfeição ocasionada pelo empenamento / *warping.* Fonte: *Tech CD, 2021*.

Materiais semicristalinos, como ABS, são particularmente suscetíveis ao *warping*, pois apresentam maior retração térmica em comparação aos polímeros amorfos, como PLA (HOSSAIN, RAMOS, ESPINOSA, 2014). Fatores como temperatura

da mesa, adesão ao substrato e estratégia de deposição influenciam a severidade do problema (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016).

Soluções incluem o uso de câmaras aquecidas para manter temperaturas homogêneas, adesivos específicos na mesa de impressão e otimização dos parâmetros de processamento, como velocidade e temperatura do bico extrusor (DING, *et al.*, 2019). Além disso, simulações computacionais ajudam a prever e minimizar o *warping* antes da fabricação (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

A redução do *warping* é essencial para garantir precisão dimensional e qualidade superficial, promovendo maior confiabilidade na manufatura aditiva.

2.3.3.5 Delaminação

A delaminação das camadas (figura 21) e o descolamento lateral (entre o preenchimento e os perímetros) podem ocorrer devido ao encolhimento do polímero ou à falta de energia de ligação entre as estruturas depositadas. O deslocamento de camadas pode ocorrer devido à temperatura excessiva nos motores de passo ou drivers, falta de energia nos motores ou falha mecânica. O superaquecimento das peças ocorre principalmente devido ao trabalho com uma temperatura de extrusão excessiva (MELO, 2022).



Figura 21: Delaminação de camadas por temperatura não adequada. Fonte: *WEBB, 2020*.

2.3.3.6 Ghosting

O *ghosting* é um problema de qualidade de impressão 3D que pode prejudicar a aparência visual de um modelo. Geralmente, é possível identificá-lo visualmente ao notar que as paredes externas de uma peça parecem onduladas ou simplesmente não são lisas. Esse problema de qualidade de impressão ocorre na impressão 3D quando o

bocal é impedido de depositar material de forma controlada, criando um ambiente de impressão em constante mudança. O efeito de ondulação nas laterais das impressões é resultado das vibrações nas camadas, da velocidade de impressão muito alta e do deslocamento na área de impressão (figura 22).

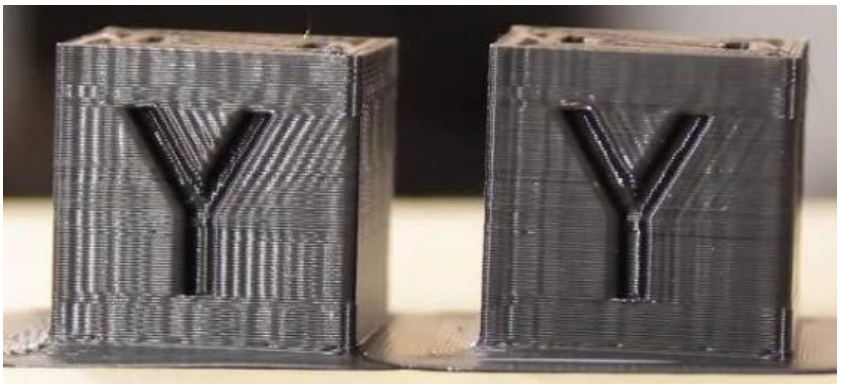


Figura 22: Fenômeno *ghosting.* Fonte: *MAGMA3D, 2019*

As soluções para esse problema são apresentadas a seguir: apertar as correias da impressora; imprimir em uma velocidade mais lenta, no entanto, é importante mencionar que nos casos das impressoras Ender 3 PRO finalmente, uma das maneiras de reduzir as vibrações é imprimir em uma base sólida e estável (O'CONNELL, KONDO, 2022).

2.3.3.7 Stringing

Por fim, o defeito conhecido como *stringing* (ou *oozing)*, figura 23, refere-se à formação de finos fios de filamento plástico entre partes distintas de uma peça impressa, geralmente visíveis em deslocamentos não extrusivos do bico de impressão. Esse fenômeno ocorre principalmente devido ao vazamento do material fundido por inércia ou pressão interna residual no bico durante os movimentos de retração, especialmente em geometrias complexas com múltiplos vazios ou elementos distantes entre si (TURNER, STRONG, GOLD, 2014) e (CHACÓN *et al.*, 2017).

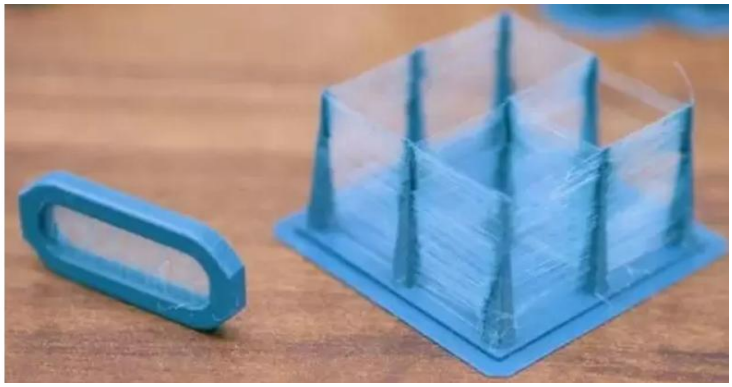


Figura 23: Ocorrência do defeito *stringing*. Fonte: *3D LAB, 2020*

Fatores que contribuem para o *stringing* incluem configurações inadequadas de retração, temperatura de extrusão elevada, velocidade de deslocamento entre partes muito baixa, ou umidade presente no filamento, que leva à vaporização e consequente vazamento de material (TORRES *et al.*, 2015). O controle preciso desses parâmetros, aliado à escolha adequada do material (como PLA, ABS ou PETG), é essencial para minimizar esse defeito e garantir maior qualidade superficial e dimensional das peças produzidas.

2.3.4. Aplicações da MA em VSA

A MA tem contribuído na fabricação de componentes para VSAs, oferecendo soluções inovadoras para a redução de peso, aumento da eficiência hidrodinâmica e personalização de peças complexas. O uso da impressão 3D permite a fabricação de estruturas leves e otimizadas para operar em ambientes extremos, reduzindo custos de produção e tempo de desenvolvimento (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Materiais como polímeros reforçados e metais impressos via fusão seletiva a laser (SLM) têm sido amplamente utilizados para a fabricação de cascos e componentes estruturais, garantindo resistência à corrosão e alta durabilidade (WANG, GARDNER, BOUSFIELD, 2017).

Além da estrutura externa, a manufatura aditiva também é aplicada na produção de hélices customizadas, carcaças para sensores e sistemas de propulsão de alto desempenho, permitindo ajustes aerodinâmicos e otimização do fluxo de água ao redor do veículo (GAO, *et al.*, 2020). Essa flexibilidade de design possibilita a integração de canais internos para roteamento de cabos e sistemas eletrônicos, reduzindo o número de peças e pontos de falha (BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2018). Outra aplicação promissora é a impressão 4D, onde materiais programáveis podem alterar suas propriedades em resposta a estímulos externos, possibilitando ajustes na forma e

hidrodinâmica do VSA durante a missão (LEE, AN, CHUA, 2019).

De um modo geral, a precisão dimensional das peças fabricadas pode variar dependendo do processo de impressão utilizado. Métodos como SLM e sinterização seletiva a laser (SLS) oferecem tolerâncias menores e maior fidelidade ao projeto original em comparação com processos como fusão e deposição de material (FFF) (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016). Entretanto, estes processos ainda apresentam um custo mais elevado do que o processo FFF utilizado para esta pesquisa.

Nos próximos subtópicos são apresentados alguns exemplos práticos de aplicações de MA em módulos e sistemas que já estão sendo desenvolvidos para VSA, pelo processo FFF, reforçando a importância dessa tecnologia para a otimização de design, redução de peso, personalização de componentes e melhoria do desempenho estrutural em ambientes subaquáticos desafiadores.

2.3.4.1 Proa e Popa

O desempenho hidrodinâmico de um VSA depende significativamente do design da proa, popa e lemes. O uso de perfis aerodinâmicos, como os da série NACA, permite reduzir o arrasto e melhorar a eficiência hidrodinâmica. O perfil NACA 0035, em particular, apresenta características favoráveis para aplicação subaquática devido à sua simetria e distribuição de espessura (ŽUKAUSKAS, LYRINTZIS, PAPADAKIS, 2018).

A equação NACA, originalmente desenvolvida para perfis aerodinâmicos de asas, tem sido amplamente aplicada na modelagem hidrodinâmica de cascos de VSAs, contribuindo na definição das geometrias da proa e da popa. Essa abordagem permite projetar superfícies hidrodinamicamente eficientes, reduzindo o arrasto e otimizando a estabilidade do veículo em meios aquáticos (NEWMAN, 1977). A utilização de perfis NACA na proa resulta em uma distribuição suave da pressão ao longo do casco, minimizando a formação de turbulência e contribuindo para a eficiência energética do VSA (BRENNEN, 1982).

Segundo (HOERNER, 1965), na região da popa a aplicação de perfis NACA é crucial para garantir um escoamento mais uniforme, reduzindo a separação do fluxo e, consequentemente, as forças de resistência indesejadas. Além disso, estudos demonstram que a adoção de seções NACA na transição entre o corpo principal e a propulsão pode melhorar significativamente a eficiência do sistema de propulsão, otimizando o empuxo gerado e reduzindo o consumo energético do veículo (MARCHAJ, 2000).

A popa influencia diretamente a direção e o desempenho do sistema de propulsão. O uso do perfil NACA 0035 pode ajudar a suavizar a separação do fluxo, reduzindo o arrasto induzido e melhorando a eficiência propulsiva (FELLI, FALCHI, GUJ, 2011). No caso das peças impressas é importante a implementação de pós processamento para reduzir o atrito, como processos de lixamento e aplicações de resinas que ajuda o perfil NACA na hidrodinâmica.

A modelagem baseada na equação NACA também permite uma maior adaptabilidade dos cascos de VSAs a diferentes condições operacionais. Dependendo da missão do veículo, diferentes séries NACA podem ser escolhidas para atender a requisitos específicos de velocidade, estabilidade e manobrabilidade (SON, NO, 2018). Em conjunto com simulações hidrodinâmicas avançadas, essa abordagem tem sido fundamental para o desenvolvimento de veículos mais eficientes para aplicações militares, exploração oceânica e monitoramento ambiental. Assim, a utilização da equação NACA 0035 na modelagem de cascos de VSAs representa uma interseção essencial entre engenharia aeroespacial e naval, promovendo melhorias significativas no desempenho hidrodinâmico desses veículos. Na figura 24 é possível observar a vista explodida do modelo 3D de uma concepção da popa para fabricação por MA.

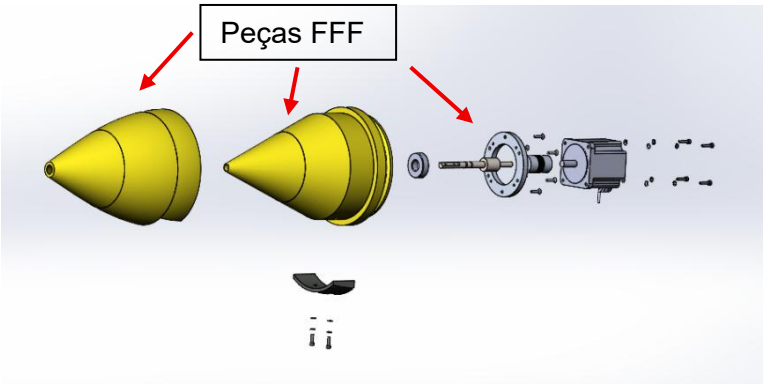


Figura 24: Vista Explodida da Popa do VSA. Fonte: Autor.

A equação NACA 0035 utilizada na modelagem de cascos de VSAs é derivada das equações clássicas para perfis aerodinâmicos. A forma do casco é frequentemente projetada com base em perfis hidrodinâmicos otimizados para minimizar o arrasto e melhorar a eficiência do escoamento. A curvatura do camber (curvatura da linha média do perfil) para a série NACA 4 dígitos, que é amplamente utilizada na modelagem da proa e da popa dos VSAs, é dada pela equação 1:

$$z_c\,(x) = \begin{cases} \frac{m}{p^2}(2px - x^2), & 0 \le x \le p \\ \frac{m}{(1-p)}\left((1-2p) + 2px - x^2\right), & p < x \le 1 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- $z_c\ (x)$ é a posição da linha média ao longo do eixo x;
- m é o máximo deslocamento da linha média (camber máximo);
- p é a posição ao longo do comprimento do perfil onde ocorre o camber máximo;
- x é a coordenada ao longo do comprimento do perfil normalizado entre 0 e 1.

A distribuição da espessura do perfil simétrico é dada pela equação 2:

$$y_t\ (x) = \frac{t}{0.2}\left(0.2969\sqrt{x}\ - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4\right) \quad (2)$$

Onde:

- $y_t\ (x)$ é a metade da espessura total em um ponto;
- $t = 0.35$ é a espessura máxima do perfil em relação ao comprimento da corda (espessura máxima de 35% da corda);
- x é a posição normalizada ao longo da corda (Abbott & von Doenhoff, 1959).

Para a modelagem de cascos de AUVs, a combinação dessas equações permite gerar superfícies suaves e hidrodinamicamente eficientes, reduzindo o arrasto e melhorando o desempenho do veículo (SON, NO, 2018). No design da proa, um perfil NACA com camber reduzido que melhora a penetração na água e reduz turbulências. Já na popa, o perfil é otimizado para reduzir a separação do fluxo e melhorar a eficiência da propulsão (NEWMAN, 1977). Além disso, esse perfil pode ser otimizado para acomodar hélices e sistemas de propulsão a jato, promovendo um melhor acoplamento com o fluxo de água.

Com o avanço das técnicas de manufatura aditiva, tornou-se possível fabricar geometrias complexas baseadas em equações NACA com alta precisão, garantindo a fidelidade do projeto hidrodinâmico (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). Na figura 25 é possível observar a impressão 3D da proa advindo do perfil NACA 0035.

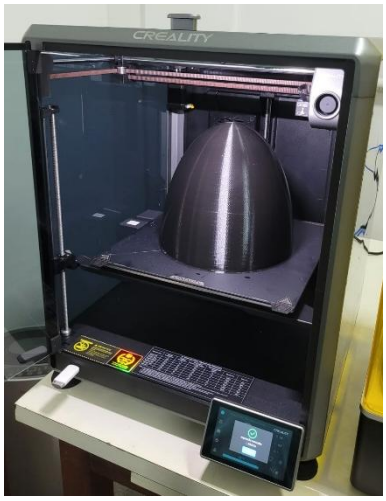


Figura 25: Impressão por FFF da Proa de um VSA. Fonte: Autor.

Assim foi possível obter o perfil NACA com uma boa precisão para as peças impressas, ratificando o que foi relatado por (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016), que a precisão dimensional dos componentes impressos é um fator crítico para garantir a eficiência hidrodinâmica e o correto funcionamento dos sistemas de vedação e encaixe, sendo influenciada por parâmetros de impressão e pós-processamento

2.3.4.2 Flaps / Lemes

Os lemes e flaps de VSAs também são frequentemente projetados com base nos perfis NACA, para otimizar a eficiência hidrodinâmica e minimizar o arrasto. Esses perfis são escolhidos por suas propriedades bem documentadas de sustentação e resistência ao escoamento, garantindo estabilidade e manobrabilidade em diferentes condições operacionais (NEWMAN, 1977) e (SON, NO, 2018).

Para otimizar o desempenho dos lemes e flaps, as simulações computacionais de dinâmica de fluidos (CFD) são frequentemente usadas para refinar a geometria e melhorar a manobrabilidade dos VSAs (BOSCHETTO, BOTTINI, 2016). A MA também desempenha um papel fundamental na produção de superfícies aerodinâmicas complexas com alta precisão dimensional, garantindo que os perfis projetados sejam reproduzidos fielmente (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). No exemplo de vista explodida do módulo de Controle e Guiagem (Figura 26), é possível observar as estruturas de fixação, os componentes internos e peças feitas por FFF.

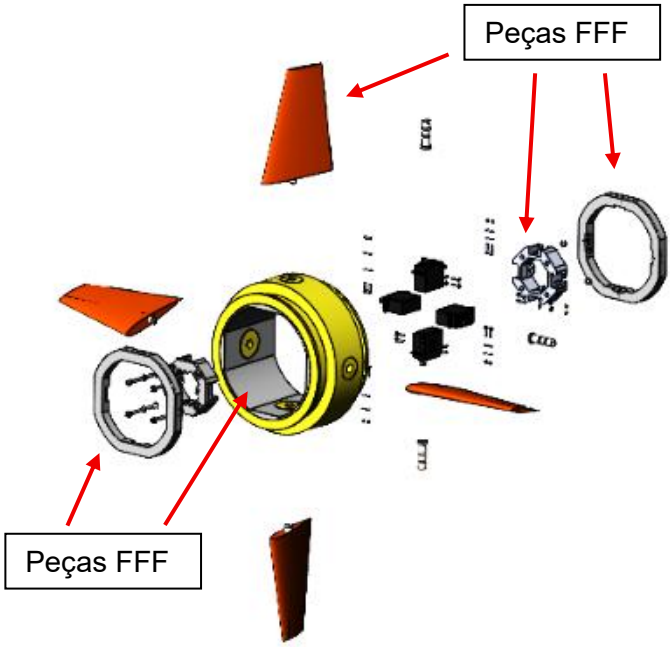
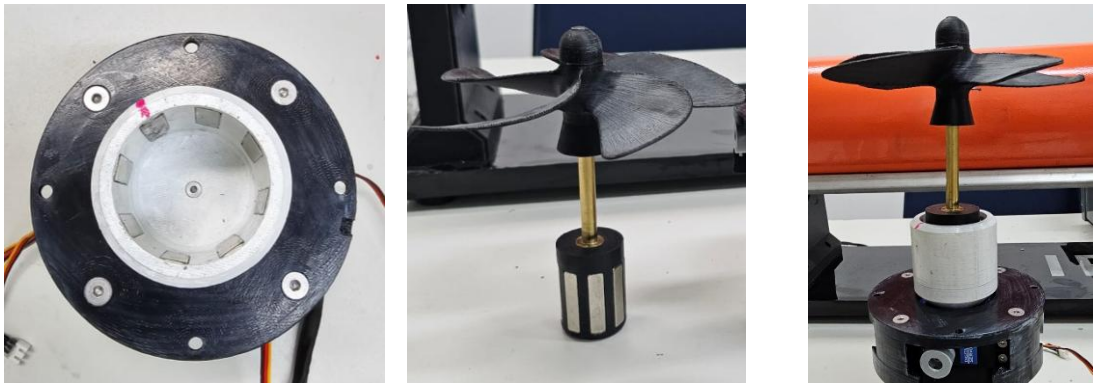


Figura 26: Vista Explodida da seção de lemes. Fonte: Autor.

2.3.4.3. Vedação Magnética

A vedação de compartimentos e componentes é um fator crítico no projeto de um VSA, especialmente em aplicações que envolvem grandes profundidades, onde a pressão hidrostática impõe desafios significativos à integridade estrutural do sistema. Muitas partes de veículos submarinos têm conexões entre módulos/seções, que são fixos por meio de orings e parafusos que garantem a estanqueidade entre seções estáticos, entretanto para as partes onde há movimento de rotacional, como por exemplo eixo do motor, eixos dos lemes, necessita de outro tipo de vedação. Há vedações, entretanto para elementos móveis como eixos motores exige uma vedação mais específica. Dentre as soluções de vedação disponíveis, os selos magnéticos apresentam uma alternativa promissora por sua durabilidade, resistência a desgastes mecânicos e capacidade de manter a estanqueidade mesmo sob variações estruturais (KIM, PARK, LEE, 2018). Os elementos do sistema de vedação magnética, podem ser vistos na figura 27, que realiza especificamente a movimentação do eixo do hélice definido para o VSA



(a) (b) ©

Figura 27: Sistema de Vedação Magnética (a) Peça acoplada ao motor (b) Peça acoplada ao eixo do hélice (c) Elementos em funcionamento. Fonte: Autor.

Os sistemas de vedação magnética podem ser classificados em duas categorias principais, vedação magnética direta e vedação por ferrofluido:

- Vedação Magnética Direta: Consiste no uso de ímãs permanentes que exercem força de atração sobre superfícies metálicas ou ferromagnéticas, comprimindo uma junta flexível, geralmente composta por elastômeros reforçados com partículas magnéticas. Essa compressão contínua reduz significativamente o risco de infiltração de água, mesmo em condições de variação térmica ou mecânica (SHIN, KIM, 2020).
- Vedação por Ferrofluido: Essa tecnologia baseia-se na utilização de um ferrofluido – uma suspensão coloidal de nanopartículas ferromagnéticas em um líquido portador – que é mantido no local por um campo magnético gerado por ímãs permanentes ou eletroímãs. O ferrofluido forma uma barreira dinâmica altamente eficaz contra a entrada de fluidos, sendo especialmente útil em aplicações de alta rotação ou vedação de eixos de propulsão em VSA (RAJ, BANDYOPADHYAY, 2019).

Os sistemas de vedação magnética apresentam diversas vantagens em comparação com métodos tradicionais, como vedações de borracha ou selos mecânicos. Proporciona menor desgaste mecânico, pois a ausência de atrito direto entre componentes reduz a degradação do sistema ao longo do tempo, tem maior resistência à pressão, permitindo aplicações em operações subaquáticas profundas sem comprometer a vedação e possui autocompensação dinâmica, onde a força magnética mantém a vedação eficaz mesmo diante de pequenas deformações estruturais causadas por variações de pressão ou temperatura.

Devido a essas características, os selos magnéticos vêm sendo amplamente estudados e aplicados em diversos sistemas submersíveis, incluindo submarinos, bombas submersas e motores de propulsão para VSA. Estudos recentes demonstram

que a combinação de novos materiais magnéticos e ferrofluidos otimizados tem potencial para aprimorar ainda mais a confiabilidade e a eficiência dessas vedações, tornando-as uma solução viável para aplicações em ambientes extremos BAILEY; JONES; WILLIAMS, 2021.

2.3.4.4. Estrutura de Fixação do DVL

A instalação de um *Doppler Velocity Log (DVL)* em um Veículo Subaquático Autônomo (VSA) requer atenção meticulosa às especificações fornecidas pelos fabricantes para garantir desempenho e precisão ideais.

O DVL deve ser rigidamente fixado à estrutura do VSA para evitar movimentos indesejados que possam comprometer a precisão das medições. É recomendado alinhar a marca frontal do DVL com a proa do veículo, assegurando que as leituras de velocidade correspondam corretamente à direção de movimento do VSA. A figura 28 representa um desenho esquemático da recomendação do fabricante Nortek para garantir o alinhamento entre a IMU e o DVL.

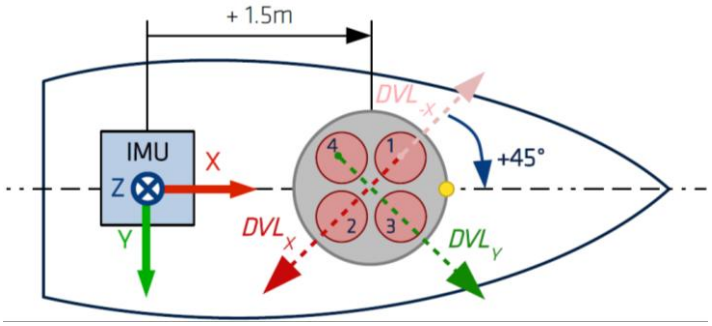
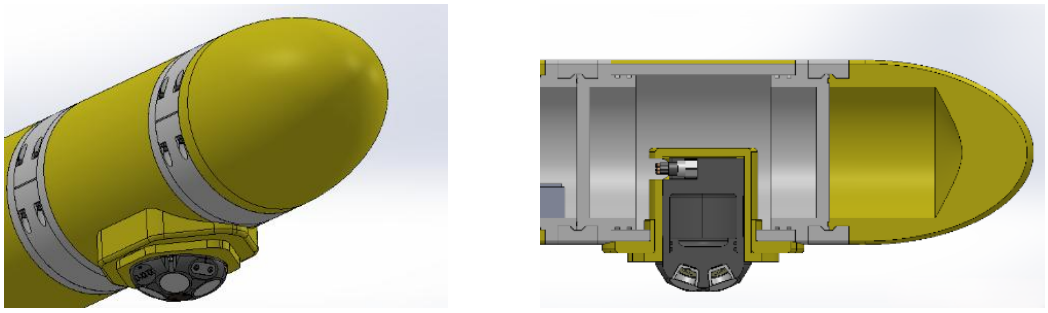


Figura 28: Desenho Esquemático de Alinhamento entre UMI e *DVL*. Fonte: *SBG Systems, 2025*.

Além da preservação do alinhamento durante a sua fixação, também é essencial garantir que o DVL esteja posicionado de maneira a minimizar interferências acústicas e evitar obstruções que possam afetar a propagação das ondas sonoras. Seguindo essas recomendações, é possível otimizar a integração do DVL no VSA, garantindo medições precisas e confiáveis durante as operações subaquáticas. Na figura 29, observa-se o modelo 3D da fixação do DVL, que será produzido por MA. Esta peça integra uma área crítica do projeto devido ao desafio imposto pela fixação do DVL na geometria cilíndrica do casco. A utilização de uma estrutura impressa em 3D pode se mostrar como uma solução para atender aos requisitos técnicos, assegurando o alinhamento preciso entre o UMI e o DVL.



(a) (b)

Figura 29: Modelo 3D da fixação do DVL (a) Vista isométrica (b) Vista de corte lateral.
Fonte: Autor.

A garantia da precisão da impressão 3D dessa peça é um dos fatores que justifica a avaliação dimensional de peças impressas para produção em série e de baixo custo. O controle dimensional contribui para a padronização do processo produtivo, otimização de recursos e redução de desperdícios, aspectos essenciais em projetos que visam eficiência econômica sem renunciar à qualidade e confiabilidade dos componentes.

No contexto dos VNTs, especialmente VSAs, a integração de componentes fabricados por MA tem revolucionado o design e o desempenho desses sistemas. A MA permite a produção de peças complexas, leves e customizáveis com elevada precisão. Esses atributos são importantes para otimizar a relação peso-potência e melhorar a eficiência energética dos veículos (PATEL, SINGH, THOMPSON, 2020). Entretanto, para garantir a confiabilidade e segurança dos componentes produzidos, é essencial realizar uma avaliação dimensional rigorosa. Essa inspeção assegura que as peças atendam aos requisitos técnicos e às especificações do projeto, contribuindo para a funcionalidade do sistema como um todo (JONES, WANG, 2021).

2.4 Inspeção Dimensional

A inspeção dimensional na MA é um processo crítico para garantir a qualidade e a confiabilidade das peças produzidas em série, especialmente quando se trata de sistemas que necessitam de requisitos de tolerância, como o VSA. A MA permite a fabricação de componentes complexos com geometrias intrincadas, mas a repetibilidade dimensional dessas peças é um desafio significativo, uma vez que variações mínimas podem comprometer o desempenho das estruturas mecânicas, as

quais, em ambientes subaquáticos, podem ser submetidas a fatores que exijam uma necessidade maior em relação a tolerâncias.

Ainda que polímeros não sofram corrosão eletroquímica como os metais, eles podem ser afetados por processos de degradação química, absorção de água, inchamento e envelhecimento ambiental, que também podem comprometer suas propriedades dimensionais e mecânicas ao longo do tempo.

A confiabilidade dimensional das peças em VSAs é crucial, pois falhas podem levar a consequências graves, como alagamento de módulos eletrônicos em ambientes subaquáticos. Portanto, a integração de sistemas de inspeção dimensional automatizados e a adoção de práticas metrológicas robustas, alinhadas à ISO 2768, são indispensáveis para garantir a qualidade e a segurança das peças fabricadas em MA.

A avaliação dimensional aplicada à MA deve seguir uso das normas ISO 2768 Partes 1 e 2, que estabelece tolerâncias gerais para dimensões lineares e angulares, e a ISO/ASTM 52902:2023, que especifica diretrizes atualizadas para peças fabricadas aditivamente. Técnicas de inspeção dimensional, como digitalização 3D, medição por coordenadas (MMC) e interferometria a laser, são utilizadas para verificar a conformidade das peças com os projetos CAD. Em produção em série, a automação dessas inspeções é essencial para manter a eficiência e a consistência, reduzindo o tempo de inspeção e minimizando erros humanos.

A inspeção dimensional de peças é um processo para garantir que peças e componentes de uma montagem atendam às especificações técnicas e tolerâncias dimensionais estabelecidas. De acordo com a Inspesolda, 2019, a inspeção dimensional visa verificar se as dimensões dos componentes estão dentro dos limites tolerados, conforme definido pelos desenhos e especificações técnicas.

A norma ISSO 2768 foi publicada pela Organização Internacional de Normalização (ISO) em 1989 com o objetivo de padronizar tolerâncias gerais para peças usinadas e fabricadas por métodos convencionais, quando não há especificações detalhadas nos desenhos técnicos. Dividida em duas partes, a ISO 2768-1 trata das tolerâncias dimensionais lineares e angulares, classificadas em quatro níveis de precisão: fina (f), média (m), grossa isso e muito grossa (v), como pode-se observar na Tabela 01, enquanto a ISO 2768-2 aborda as tolerâncias geométricas de forma e posição, como retidão, paralelismo, perpendicularidade e batimento. Essa padronização simplifica os desenhos técnicos, reduz erros de interpretação e facilita o controle de qualidade, sendo amplamente utilizada em processos de fabricação mecânica e produção em série.

Tabela 1: Tabela de Tolerâncias ISO 2768. Fonte: Autor.

Dimensões em milímetros

Classe de Tolerâncias		**Afastamento admissíveis para intervalo de dimensões básicas**							
Designação	**Descrição**	**De 0,5[1] até 3**	**Acima de 3 até 6**	**Acima de 6 até 30**	**Acima de 30 até 120**	**Acima de 120 até 400**	**Acima de 400 até 1000**	**Acima de 1000 até 2000**	**Acima de 2000 até 4000**
f	fino	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	-
m	médio	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c	grosso	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v	muito grosso	-	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8

[1] para dimensões nominais abaixo de 0,5 mm, o afastamento deve ser indicado junto à dimensão nominal correspondente.

A aplicação adequada dessas normas e a realização de inspeções dimensionais rigorosas são essenciais para assegurar a intercambialidade das peças e o funcionamento adequado dos sistemas em que são utilizadas. Como destacado por Setti (2010), as variações dimensionais de peças e conjuntos são inerentes aos processos de fabricação e, por esse motivo, devem ser aplicados controles dimensionais em todas as etapas de produção, visando minimizar as diferenças entre o produto virtual e o físico

A aplicação da manufatura aditiva na produção em série de componentes para VSAs tem se mostrado promissora, especialmente no que tange à inspeção dimensional e à redução de custos. Um exemplo notável é o desenvolvimento de um VSA de baixo custo com formato de torpedo, utilizando materiais facilmente acessíveis e técnicas de impressão 3D para a fabricação do casco. Este projeto demonstrou a viabilidade de se obter um veículo estanque e estável a um custo significativamente inferior aos modelos disponíveis no mercado (MENDONÇA, *et al.,* 2020).

A inspeção metrológica é essencial para garantir que peças fabricadas atendam às dimensões e tolerâncias especificadas no projeto. A utilização de uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), figura 30, é uma das soluções mais precisas para essa finalidade, permitindo medições em três eixos (X, Y e Z) com alta exatidão, além de possibilitar a verificação de geometrias complexas. A aplicação de tecnologias como a digitalização a laser nas MMCs amplia a precisão e a produtividade dos processos de inspeção (HITOP INDUSTRIAL, 2025). Alternativas às MMCs tradicionais incluem sistemas ópticos de medição, como o MaxSHOT 3D da Creaform, que oferece alta precisão em projetos de grande escala e peças complexas, sendo ideal para ambientes

que exigem mobilidade e flexibilidade (CREAFORM, 2024). A escolha da ferramenta adequada depende do nível de precisão exigido e das características do processo produtivo. Em ambientes industriais, a MMC continua sendo a principal escolha devido à sua confiabilidade em medições rigorosas (RODRIGUES, 2018).



Figura 30: Máquina de Medição por Coordenada. Fonte: Autor.

A norma ISSO 2768 define tolerâncias gerais para dimensões lineares e angulares, sendo o grau médio amplamente utilizado e adequado para a maioria das aplicações. Em projetos envolvendo MA pelo processo *FFF (Fused Filament Fabrication)* para VSAs, a classe de tolerância grau médio poderá atender às expectativas, garantindo funcionalidade e desempenho satisfatórios. No entanto, para projetos futuros que demandam um aprimoramento da precisão e confiabilidade, a classe de tolerância grau fino pode oferecer vantagens adicionais. Assim, enquanto a classe de tolerância grau médio se mostrou eficaz, a classe de tolerância grau fino pode elevar ainda mais o padrão de qualidade e desempenho desses sistemas NBR ISO 2768-1, 2001, (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado a metodologia de investigação adotada para a obtenção de resultados, bem como informações sobre a instrumentação utilizada, algumas definições referentes aos parâmetros para geração de corpos de prova e os procedimentos de inspeção dimensional empregados.

3.1. Instrumentação e Materiais Utilizados na Produção de CPs

Nesta dissertação, tomou-se como base a mesma impressora empregada por (GRGIć, *et al.*, 2023). Ou seja, foi utilizada a impressora 3D CREALITY ENDER-3 PRO (Fig. 31), cuja precisão máxima especificada pelo fabricante é de ± 0,1 mm. No caso do software de fatiamento CURA, para este trabalho, foi utilizada a versão 5.7.1.



Figura 31:Impressora Ender 3 Pro. Fonte: Autor.

Analogamente, em relação aos insumos, optou-se por adotar o mesmo material de extrusão utilizado por GRGIć, *et al.,* 2023, isto é, o filamento de PLA (grau A – original do fabricante 3DLab, e material inócuo, branco, 1,75 mm). Adicionalmente, nesta pesquisa foi acrescentada uma investigação também para o filamento ABS (grau A – original do fabricante 3DLab, e material inócuo, branco, 1,75 mm), ambos conforme especificações do fabricante 3D LAB. A pesquisa com base nesses materiais é interessante por serem facilmente encontrados no mercado, de custo acessível e com observância em diversas aplicações que utilizam peças fabricadas por MA como produto final, as quais são atendidas pelas propriedades mecânicas desses materiais (Tabela

02).

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos filamentos segundo o fabricante. Fonte: Autor.

Material	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento (%)
PLA 1,75 mm	53	3,50	6
ABS 1,75 mm	29	0,26	12

Em relação a inspeções dimensionais, as medições foram obtidas por meio de uma MMC modelo B-251 Mitutoyo, com última calibração feita em 22/09/2022, contendo o software MCOSMOS-Manual v3.0 R3 Edition 17 (Fig.32).



Figura 32: MMC modelo B-251 Mitutoyo. Fonte: Autor.

3.2. Estudo Preliminar e Considerações para Designação e Produção dos Corpos de Prova (CPs)

Nesta secção, são apresentados o detalhamento e as ponderações assumidas como critérios de decisão para a parametrização do modelo do Corpo de Prova (CP). Visando garantir a fidelidade dimensional e estrutural dos CPs, foram implementadas melhorias no sistema de impressão 3D, seguindo as diretrizes de otimização orientadas por Grgić *et al*. (2023).

Entre as intervenções realizadas, destaca-se a calibração do fluxo de material da extrusora através da adequação da relação de passos por milímetro (*E-steps*). Este procedimento é vital para corrigir desvios volumétricos, garantindo que a quantidade

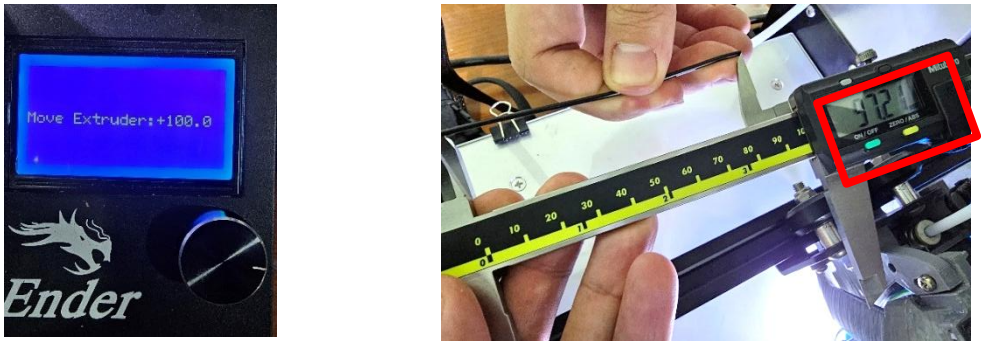
de material depositado corresponda ao volume calculado pelo fatiador. O ajuste do *firmware* baseou-se na medição física do filamento consumido em comparação ao valor comandado, sendo o fator de correção determinado pela Equação 3:

$$E_{novo} = E_{atual} \times \left(\frac{L_{teórico}}{L_{real}}\right) \qquad (3)$$

Onde:

- E_{novo} : Novo valor de passos/mm a ser configurado no firmware;
- E_{atual} : Valor de passos/mm vigente no momento do teste;
- $L_{teórico}$: Comprimento de filamento solicitado via G-code (ex: 100 mm);
- L_{real} :Comprimento real de filamento extrudido medido fisicamente.

A aplicação desta correção, ilustrada na Fig. 33, eliminou inconsistências como a subextrusão, assegurando a homogeneidade e a densidade prescrita para os ensaios mecânicos subsequentes.



(a) (b)

Figura 33: Melhorias de impressão (a) Configuração de extrusão (b) Medição real de extrusão. Fonte: Autor.

Durante a etapa inicial de calibração do equipamento, foi identificada uma anomalia de subextrusão (fluxo insuficiente de material). Este fenômeno foi diagnosticado através de um teste de extrusão controlada, onde se verificou uma discrepância negativa entre o comprimento de filamento solicitado via comando (G-code) e o comprimento real consumido pelo extrusor. Para mitigar este erro e garantir a integridade dimensional dos Corpos de Prova (CPs), realizou-se o recálculo dos passos do motor de passo do extrusor (*E-steps*). O ajuste buscou equalizar a instrução de software com a deposição física, assegurando a confiabilidade do processo. O novo valor de passos por milímetro foi determinado através da seguinte relação matemática, conforme a equação 3.

O nivelamento da plataforma de impressão foi executado para garantir a

aderência correta da primeira camada, fator crítico para evitar empenamentos (*warping*) ou descolamento da peça durante a fabricação. O procedimento consistiu no ajuste da distância entre o bico extrusor (*nozzle*) e a mesa aquecida (*bed*) em diversos pontos estratégicos: os quatro cantos e o centro da área de impressão. Utilizou-se um calibrador de folga, que também pode ser feito pelo método do papel, para assegurar que a distância do eixo Z estivesse uniforme em toda a superfície. O objetivo foi obter uma compressão adequada do filamento na primeira camada, garantindo uma base estável para as camadas subsequentes.

A produção dos CPs foi dividida em três macro etapas: Modelo CAD e Conversão do arquivo STL, Processo de Fatiamento e Impressão 3D.

- Modelagem *CAD* e Conversão *STL*: A geometria dos corpos de prova foi desenhada em software *CAD (Computer-Aided Design)*, respeitando as normas dimensionais aplicáveis. Posteriormente, o modelo sólido foi exportado para o formato *STL (Standard Triangle Language)*, convertendo a geometria em uma malha de triângulos interpretável pelo software de preparação.
- Processamento de Fatiamento (*Slicing*): O arquivo de malha foi importado para o software fatiador (*Slicer*). Nesta etapa, foram definidos os parâmetros cruciais do processo, como: altura de camada, densidade de preenchimento *(infill*), temperaturas de bico e mesa, e velocidade de impressão. O resultado desta etapa foi a geração do arquivo *G-code*, contendo as coordenadas e instruções numéricas para a máquina.
- Impressão 3D: O *G-code* foi transmitido à impressora, que executou a fabricação aditiva pelo método *FFF (Fused Filament Fabrication)*, depositando o material termoplástico camada por camada até a consolidação final da geometria física.

3.2.1. Modelo CAD e Conversão do arquivo STL

O estudo teve início com base no modelo de CP utilizado por Grgić, *et al*., 2023, com isso adotou-se para a implementação tridimensional do CP no programa *SolidWorks 2022*, um toro com a dimensão do diâmetro interno de 35 mm, diâmetro externo de 50 mm e altura de 10 mm, conforme é mostrado na figura 34.

Dimensões em milímetro.

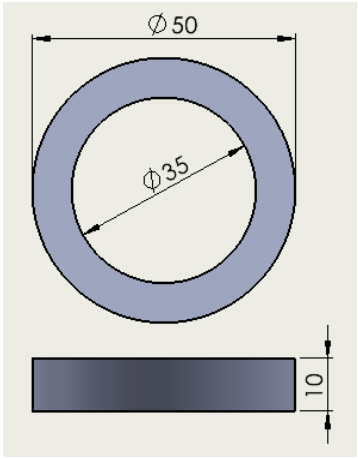


Figura 34: Modelo do CP 01. Fonte: Autor.

Adicionalmente, foi feita uma nova avaliação alterando os diâmetros externo e interno, reduzindo os valores para a metade do valor inicial do CP 01, (Fig. 35).

Dimensões em milímetro.

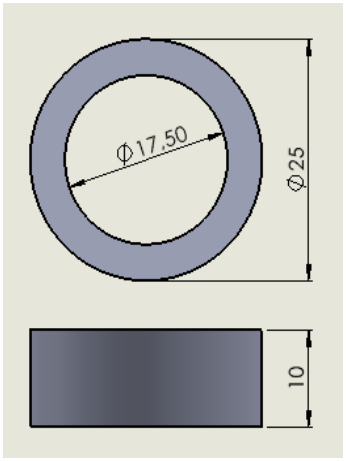


Figura 35: Modelo CP reduzido. Fonte: Autor.

É importante ressaltar que, de acordo com a referência Grgić; *et al*., 2023, é possível perceber que, em objetos com dimensões circulares, existe influência do refinamento da malha triangular durante a conversão do modelo sólido em arquivo STL (Fig. 36).

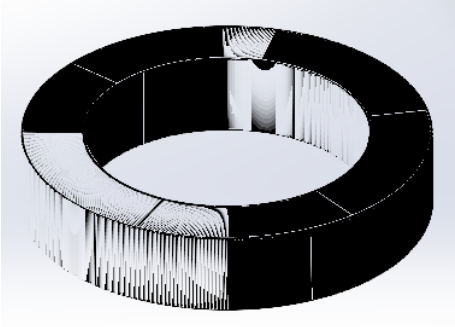


Figura 36: Modelo do CP em STL com resolução máxima. Fonte: Autor.

Conforme foi mencionado no capítulo 2, para a conversão do arquivo CAD para STL, a configuração do programa Solidworks foi personalizada para a resolução em máxima do software, com os valores de tolerância de 0,0035mm para o parâmetro “Desvio” e de 0,5º para o ângulo (Fig. 37).

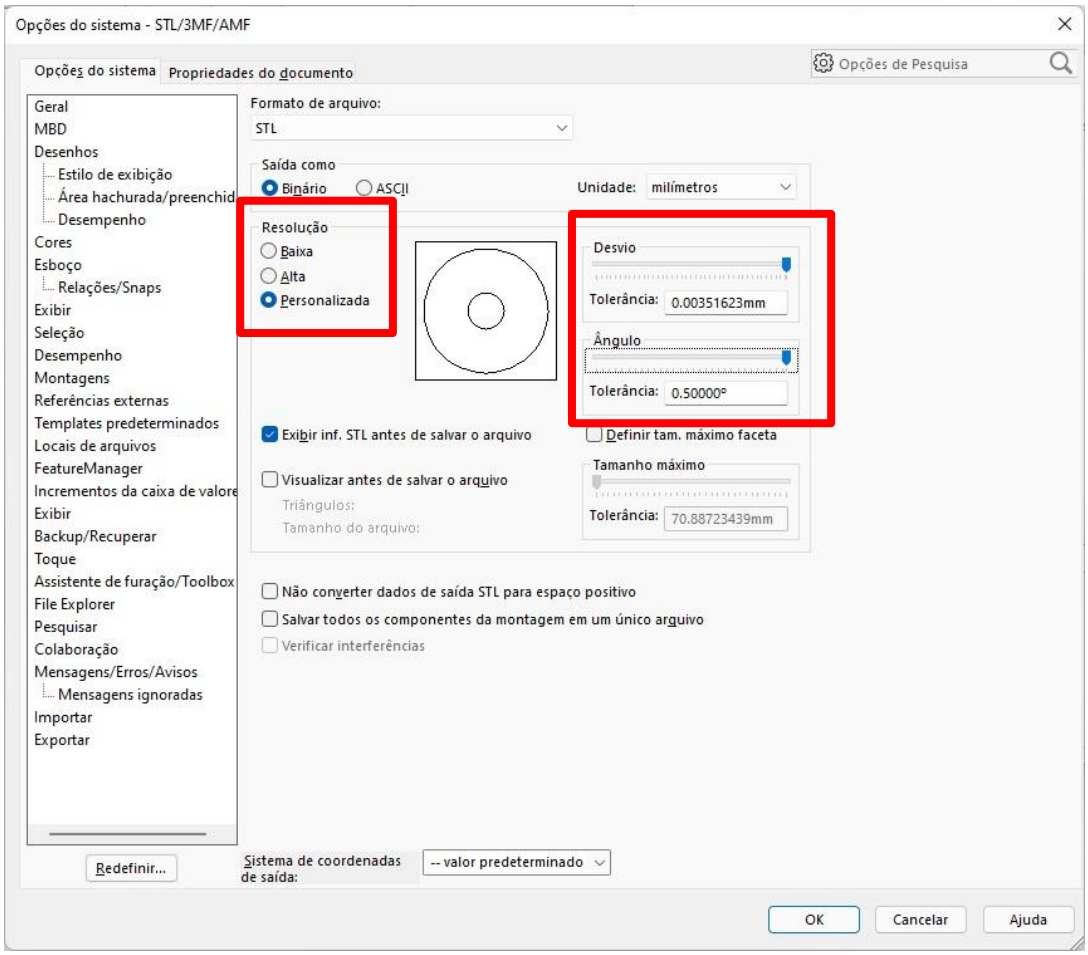


Figura 37: Configuração do SolidWorks para resolução máxima. Fonte: Autor.

Na figura 38, apresenta-se as dimensões do CP utilizado para esta pesquisa, após a conversão em *STL*, utilizando a resolução personalizada que atingiu a melhor

performance, para a configuração de refinamento de malha, cujas medidas permaneceram idênticas ao do modelo *CAD*.

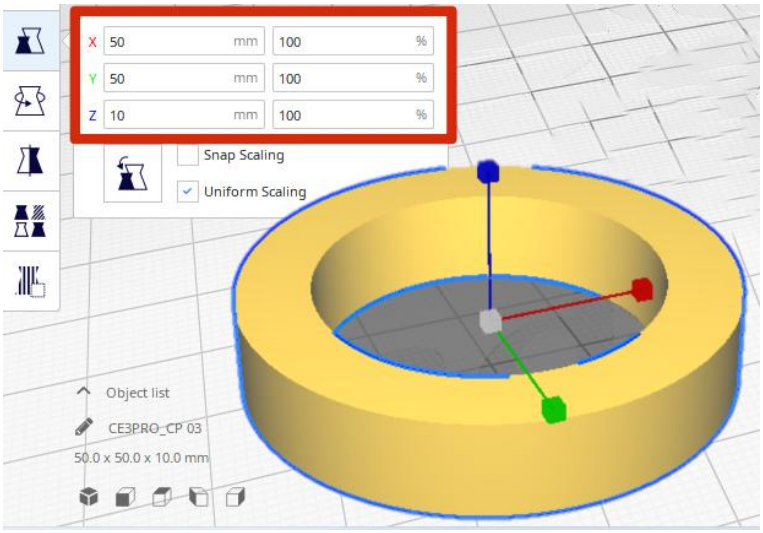


Figura 38: STL com Resolução Máxima no programa Cura. Fonte: Autor.

3.2.2 Processo de Fatiamento

Inicialmente, a definição da densidade de preenchimento baseou-se na análise comparativa entre a eficiência de manufatura e a maximização das propriedades mecânicas. Adotou-se o percentual de 20% como linha de base, configurado como padrão no software *Ultimaker Cura*, por representar o equilíbrio industrial entre redução de tempo de impressão e sustentação estrutural adequada para as camadas superiores. Em contrapartida, a densidade de 100% foi selecionada para simular um corpo sólido, eliminando a porosidade interna. Estudos recentes confirmam que o aumento da densidade para níveis próximos a 100% eleva significativamente a resistência à tração e a rigidez, embora com o custo de maior consumo de material e tempo de fabricação (LIU *et al.*, 2025).

A seleção dos padrões Linha, Grade e Giróide permite avaliar comportamentos mecânicos, geométricos e dimensionais distintos. O padrão de Linha e Grade (*Grid*) foram avaliados pela rigidez ortogonal e velocidade de deposição, sendo o padrão Grade reconhecido por sua eficiência em absorção de energia em estruturas tubulares, apesar das limitações de anisotropia. Um dos focos da pesquisa está relacionado sobre o padrão Giróide, uma estrutura de *Superfície Mínima Triplamente Periódica* (TPMS). O tipo Giróide oferece uma distribuição de tensão superior e comportamento quase isotrópico, apresentando uma razão resistência-peso mais eficiente do que padrões

retilíneos convencionais e minimizando falhas por concentração de tensão (AWD ALLAH *et al.*, 2024; CHIKHOUNE *et al.*, 2024). Pode ser visto como são os tipos de preenchimentos selecionados na figura 39.

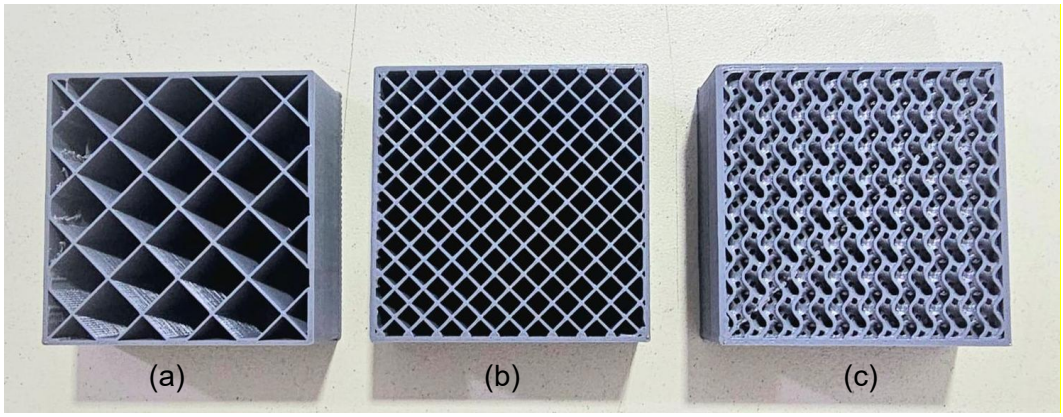


Figura 39: (a) Preenchimento tipo Linha (b) Preenchimento tipo grade (c) Preenchimento tipo giróide. Fonte: Autor.

De acordo com GRGIć, *et al.*, 2023, a configuração dos parâmetros do software CURA exerce influência nas dimensões dos CPs durante o processo de fatiamento. Portanto, utilizando como ponto de partida os parâmetros padrão do programa (Tabela 3), foi realizada uma análise preliminar dos parâmetros de fatiamento a serem adotados na fabricação do CP 01, apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de impressão padrão do CURA para PLA. Fonte: Autor.

Parâmetros de Impressão	**PLA**
Temperatura de extrusão (°C)	200
Temperatura de mesa (°C)	60
Preenchimento Interno (%)	100
Tipo de Preenchimento	Linha
Orientação do Preenchimento	45°
Avanço Linear	0
Expansão Horizontal Inicial (mm)	0
Dimensão de Furo (mm)	0
Temperatura ambiente (°C)	27
Umidade (%)	44
Início da Camada	Posterior

Em seguida, implementando das alterações propostas por Grgić, *et al.*, 2023, foi produzido o CP 02, onde optou-se por alterar apenas o parâmetro de Avanço Linear de 0 para 25, o que pode ser notado na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de impressão CP 02. Fonte: Autor.

Parâmetros de Impressão	PLA
Temperatura de extrusão (°C)	200
Temperatura de mesa (°C)	60
Preenchimento Interno (%)	100
Tipo de Preenchimento	Linha
Orientação do Preenchimento	45°
Avanço Linear	25
Expansão Horizontal Inicial (mm)	0
Dimensão de Furo (mm)	0
Temperatura ambiente (°C)	27
Umidade (%)	44
Início da Camada	Posterior

Para o primeiro CP da série 03, além do parâmetro Avanço Linear no valor de 25, foram alterados outros dois parâmetros, sugeridos por GRGIć, *et al.*, 2023, ou seja, Expansão Horizontal Inicial de 0 mm para - 0,2 mm e Dimensão de Furo de 0 mm para 0,13mm.

Para a análise dimensional, foram definidas duas cotas estratégicas nos Corpos de Prova (CPs). A primeira medida, denominada H1, foi realizada a uma altura de 1 mm em relação à base. Esta posição foi selecionada para avaliar a incidência do fenômeno 'pata de elefante' (*elephant's foot*), característico das primeiras camadas devido à compressão e gradientes térmicos da mesa. A segunda medida, H2, foi tomada a uma altura de 8 mm. Esta cota situa-se em uma região de estabilização geométrica, distante o suficiente da base para garantir que o efeito de expansão lateral não interfira na medição. Dessa forma, H2 serve como referência para a dimensão nominal dos CPs, isolando as distorções sistemáticas da interface com a plataforma de impressão, como pode ser visto na figura 40.

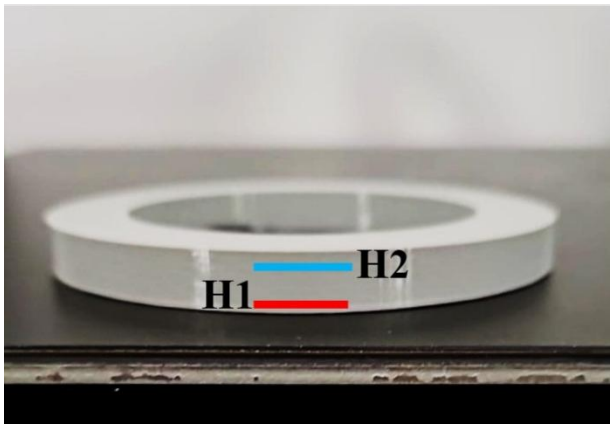


Figura 40: H1 (linha vermelha) e H2 (linha azul): Altura com e sem efeito da pata de elefante, respectivamente. Fonte: Autor.

Na tabela 5, pode-se observar as medidas dos diâmetros obtidas para os CPs 01, 02 e 03.1.

Tabela 5: Valores inspecionados para as séries CP 01, 02 e 03.1. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2	
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)
CP 01	34,759	49,860	34,801	49,866
CP 02	34,781	49,852	34,827	49,888
CP 03.1	35,079	49,785	35,055	49,895

Ao comparar as dimensões obtidas para os diâmetros destes corpos de prova, é possível observar que as diferenças entre os valores obtidos para o CP 03.1 e os valores nominais do CP Padrão (35 mm para diâmetro interno e 50 mm para diâmetro externo) ficaram praticamente na casa centesimal, enquanto no caso dos CPs 01 e 02 todos estão na casa decimal. Portanto, conclui-se que a configuração dos parâmetros adotada por GRGIć, *et al.*, 2023, a qual foram utilizados na confecção do CP 03.1, foi a que produziu os CPs com dimensões mais próximas do modelo CAD.

Portanto, a partir dessa primeira etapa de investigação, ficou definido que todos os CPs da série 03 e os das séries subsequentes seriam produzidos conforme os parâmetros apresentados na tabela 6, adotando-se esta configuração de parâmetros como padrão de impressão para o objetivo principal da pesquisa.

Tabela 6: Parâmetros de impressão da série CP 03 e subsequentes. Fonte: Autor.

Parâmetros de Impressão	PLA	ABS
Temperatura de extrusão (°C)	200	230
Temperatura de mesa (°C)	60	100
Altura entre o bico e mesa (mm)	0,2	0,2
Diâmetro do Filamento (mm)	1,75	1,75
Preenchimento Interno (%)	20 e 100	20 e 100
Tipo de Preenchimento	Linha, Grade e Giróide	Giróide
Orientação do Preenchimento	45°	45°
Velocidade de impressão (mm/s)	50	50
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,4	0,4
Avanço Linear	25	25
Expansão Horizontal Inicial (mm)	-0,2	-0,2
Dimensão de Furo (mm)	0,13	0,13
Temp. ambiente (°C)	23 a 28	23 a 28
Umidade (%)	entre 44 e 65	entre 50 e 65
Início da Camada	Posterior	Posterior

3.2.3 Impressão 3D

A fabricação dos CPs por meio da impressora 3D Ender 3 Pro, utilizando os filamentos PLA e ABS da marca 3D Lab, ocorreu em sala com ambiente monitorado, com temperatura entre 23 e 28ºC e umidade entre 44 e 64%. Além disso, para facilitar a adesão do CP à mesa durante a extrusão, foi utilizada cola bastão da marca Scotch, composta por Polivinil.

Os CPs foram desenvolvidos e fabricados no Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha. Em relação a Inspeção Dimensional, foi realizada no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha.

3.3. Inspeção Dimensional

O levantamento dimensional das peças ocorreu no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha, em ambiente monitorado com temperatura de 22°C e umidade entre 45 e 60%. O procedimento de medição para cada dimensão, diâmetro interno e externo, foi realizado pelo contato da ferramenta em quatro pontos equidistantes, em duas alturas distintas do CP. A medição de cada dimensão em duas alturas se faz necessária devido a possível presença do erro de impressão denominado de “pata de elefante”, correspondente a uma variação dimensional que pode ocorrer na base das peças, repercutindo em um aumento de dimensão para medidas externas de

eixos e diminuição para medidas internas de furos. Esta discrepância pode ocorrer em função da distância ajustada entre o bico extrusor e a mesa de impressão, que leva a compressão do material depositado nas primeiras camadas, fazendo com que o material extravase lateralmente GRGIć, *et al.,* 2023, que pode ser observado na figura 41.

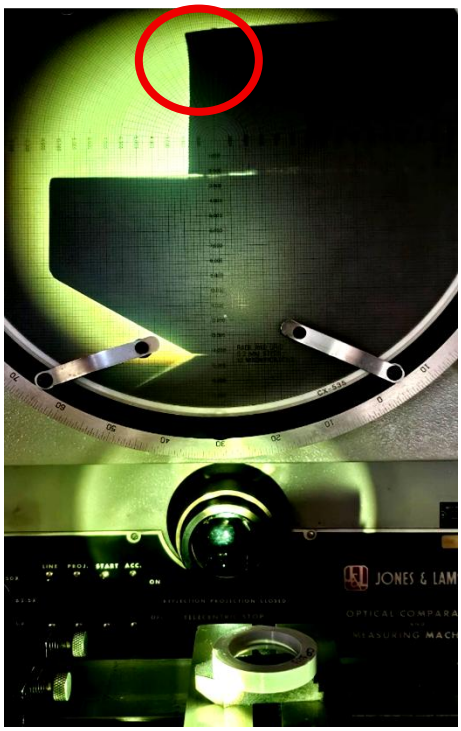


Figura 41: Anomalia “Pata de Elefante” no CP, elucidada na imagem do modelo impresso exibida em projetor de perfil. Fonte: Autor.

Desta forma, definiu-se duas alturas para serem avaliadas nos CPs, a primeira com uma altura H1 = 1 mm, próximo as primeiras camadas para avaliar o efeito da “pata de elefante”, e a segunda H2 = 8 mm, distante o suficiente da base para garantir que a “pata de elefante” não afete significativamente a dimensão nominal dos CPs. Ambas medidas referenciadas à base da mesa de impressão (Fig. 39).

3.4. Metodologia da Investigação

Para este estudo, adotou-se como procedimento de investigação a medição das dimensões de três corpos de prova para cada conjuntura de tipo de geometria (Linha, Grade e Giróide) e percentual de densidade de preenchimento (20 e 100%).

Como foi mencionado anteriormente, os CP 01 e 02 foram só utilizados para ratificação dos parâmetros para serem adotados como padrão. Os 30 CPs com as respectivas séries ser observados no esquema dos CPs produzidos no fluxograma

apresentado na figura 42. Tendo como base o corpo de prova e a impressora utilizados por GRGIć, *et al.,* 2023, a proposta é avaliar o comportamento dimensional de diâmetros internos e externos de corpos de provas fabricados em materiais ABS e PLA, considerando suas características de estabilidade dimensional e compatibilidade com as exigências dos projetos. Assim sendo, os CPs com diâmetro de 50mm externo e 35 mm interno possuem exatamente a mesma configuração do CP utilizado por GRGIć, *et al.,* 2023 e, para verificar se o comportamento das tolerâncias se mantém em dimensões menores, também se optou arbitrariamente em averiguar o desempenho para uma redução de 50% dos valores das dimensões, ou seja, foram produzidos CPs com diâmetro de 25 mm externo e 17,5 mm interno. Em relação ao parâmetro densidade (percentual de preenchimento), as configurações de 100% novamente seguem o padrão utilizado por GRGIć, *et al.,* 2023 e as configurações com 20% tem como referência a configuração mínima sugerida pelo programa de fatiamento e, neste caso, a intenção é averiguar teoricamente o pior caso em relação a capacidade de atender às tolerâncias especificadas pela Norma NBR ISO 2768.

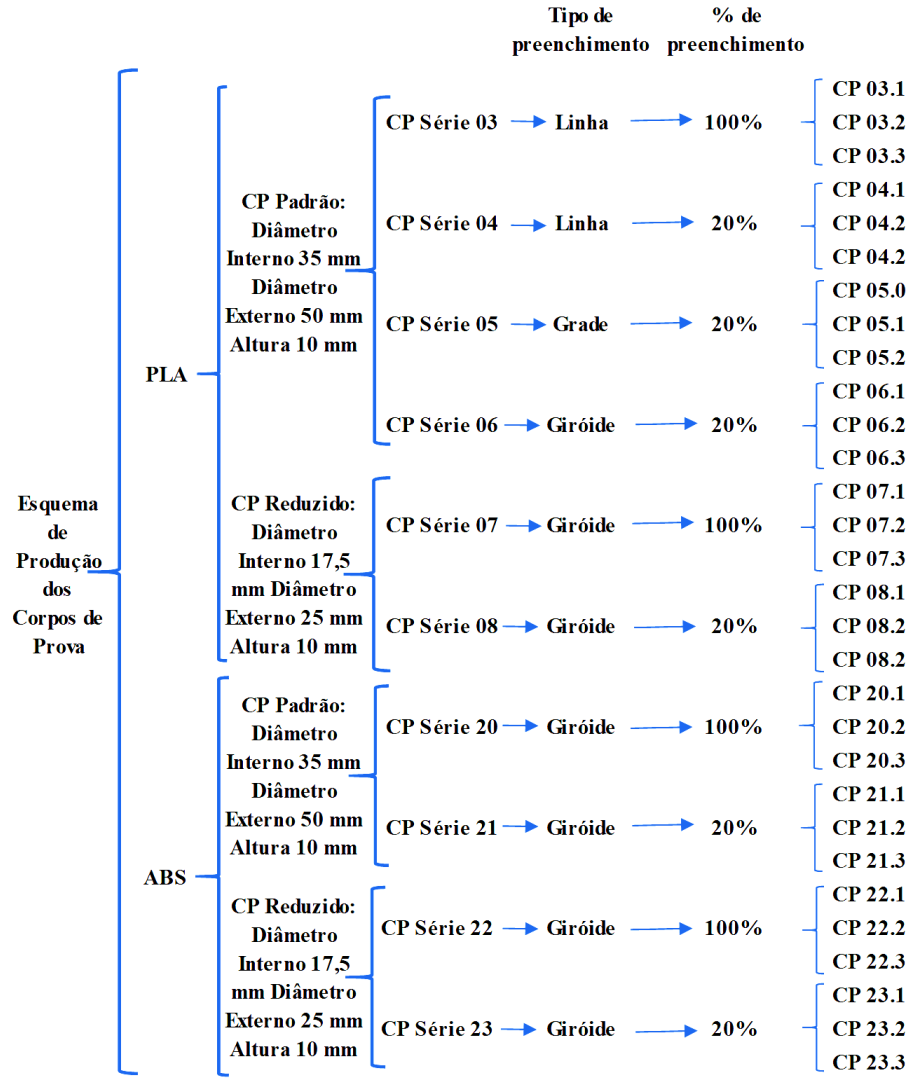


Figura 42: Esquematização da Produção de Corpos de Prova. Fonte: Autor

Para cada CP foi calculada a média e o desvio padrão das dimensões dos diâmetros internos e externos, nas alturas H1 e H2. Em relação ao percentual de preenchimento interno, para este artigo, optou-se por avaliar a configuração desse parâmetro em 100% e 20%, correspondente ao valor máximo e o valor padrão do programa CURA, permitindo a avaliação de 2 casos extremos. Quanto ao tipo de preenchimento, foram selecionados arbitrariamente os tipos linha, grade e giróide.

Desta forma, assim como os CPs da dimensão padrão se enquadram na faixa “acima de 30 até 120 mm”, os CPs reduzidos, com dimensões do diâmetro externo e interno que se enquadram em outra faixa, “acima de 6 até 30 mm”, de acordo com a Tolerância Dimensional da Norma NBR ISO 2168 - Grau Médio, conforme pode ser observado na Tabela 01, possibilitando verificar se o comportamento das tolerâncias se mantém ou não com relação a ordem de grandeza das dimensões.

Para os CPs com diâmetros menores optou-se por avaliar apenas os produzidos no percentual de 20% no padrão Giróide, pois este foi o padrão que apresentou a maior discrepância em relação à dimensão nominal do modelo CAD na investigação inicial, e com percentual de 100% de preenchimento.

3.5 Detalhamento do Processo de Medição

Conforme mencionado anteriormente, o processo de medição dos corpos de prova decorreu no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), pertencente ao Grupo de Sistemas de Armas (GSA) e, todo o processo foi realizado por um técnico especialista na área de Metrologia. Inicialmente, foi feita a calibração da MMC, que utiliza dispositivos pneumáticos, os quais são responsáveis por criar uma película de ar, que permite o deslizamento suave dos eixos X e Y, já o eixo Z que fica o cabeçote, tem uma movimentação mecânica por meio de um contrapeso. Isso reduz o atrito, evita desgaste e garante maior precisão nas medições. Após a calibração, foi definida aleatoriamente a área da mesa onde ocorreriam as medições, ou seja, cada CP foi fixado com presilhas nessa área, conforme ilustra a figura 43.



Figura 43: Fixação do CP na MMC. Fonte: Autor.

Devido à sensibilidade da ponta da agulha, que possui uma leve protuberância, e da pequena distância de 1mm entre H1 e a mesa, os corpos de prova precisaram ser posicionados invertidos em relação às alturas H1 e H2, ou seja, de cabeça para baixo, Fig. 40. Desta forma, é possível evitar contato da probe com a mesa de forma mais segura para o operador.

Para obtenção das medidas dos diâmetros internos e externos dos CPs, posicionou-se o apalpador da MMC em quatro pontos distintos, aproximadamente equidistantes, para cada uma das quatro medições, ou seja, diâmetros internos e externos nas alturas H1 e H2. O software da MMC registra os pontos de contato da agulha de medição e calcula automaticamente as dimensões dos diâmetros. Todas as informações obtidas são exibidas no monitor da MMC, conforme pode ser observado na figura 44.

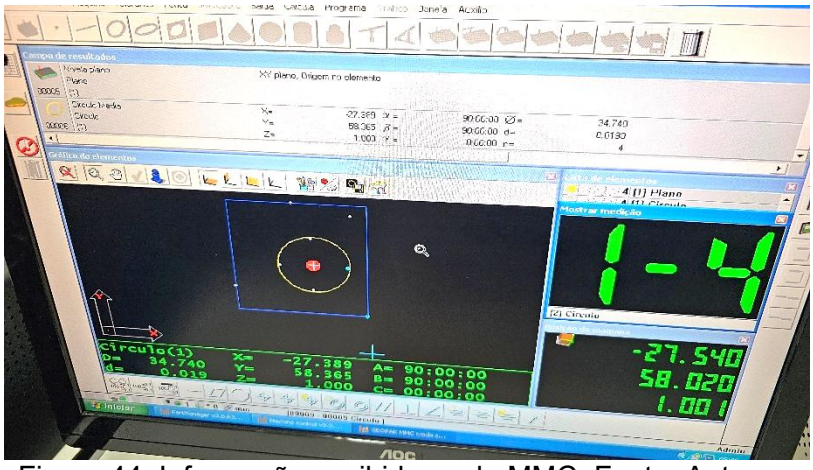


Figura 44: Informações exibidas pela MMC. Fonte: Autor.

As medidas obtidas foram organizadas em uma tabela, com os valores dos diâmetros medidos e os valores dos diâmetros nominais dos modelos tridimensionais.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de medição se inicia com o CP fabricado em material PLA, preenchimento interno (infill) 100% e com as mesmas dimensões utilizadas por GRGIć, *et al.*, 2023, tendo em vista que o objetivo principal da pesquisa é verificar o comportamento dimensional das peças impressas com os materiais PLA e ABS, e ainda, como o preenchimento também pode afetar a precisão dimensional.

Portanto, foi realizada inicialmente a medição do CP 03.1, o qual possui preenchimento com tipo da geometria “linha” com orientação de +45° e -45°. A probe (ponteira de medição) tocou quatro pontos aproximadamente equidistantes da superfície interna do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 45, sendo esses pontos localizados na altura H1 (1 mm).



Figura 45: Medição do CP 03.1. Fonte: Autor.

Esse procedimento foi repetido posteriormente na altura H2 (8 mm) de deslocamento vertical entre os planos medidos. As Figuras 46 e 47 ilustram a disposição espacial dos pontos capturados pelo apalpador da MMC, bem como a interface gráfica do software para a aquisição e análise dos dados.

Para a determinação dos diâmetros internos e externos, visto que a amostragem de quatro pontos coplanares (mesma coordenada Z) excede o mínimo geométrico necessário de três pontos, o software emprega algoritmos de ajuste matemático, tipicamente o método dos Mínimos Quadrados (Gauss). O sistema processa as coordenadas (X, Y) dos pontos medidos para projetar um círculo médio teórico, minimizando a soma dos desvios radiais decorrentes das imperfeições de forma da peça.

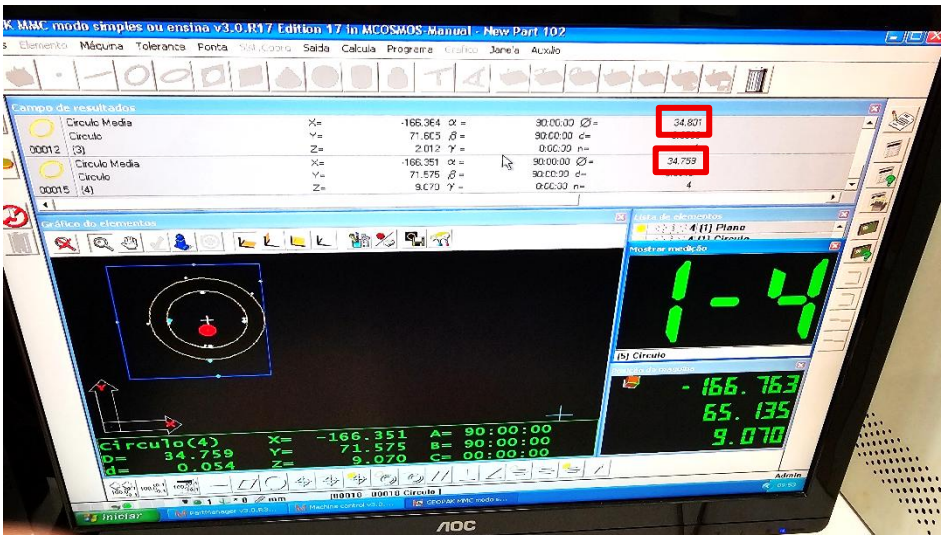


Figura 46: Visualização no monitor das medidas internas em H1 e H2. Fonte: Autor.

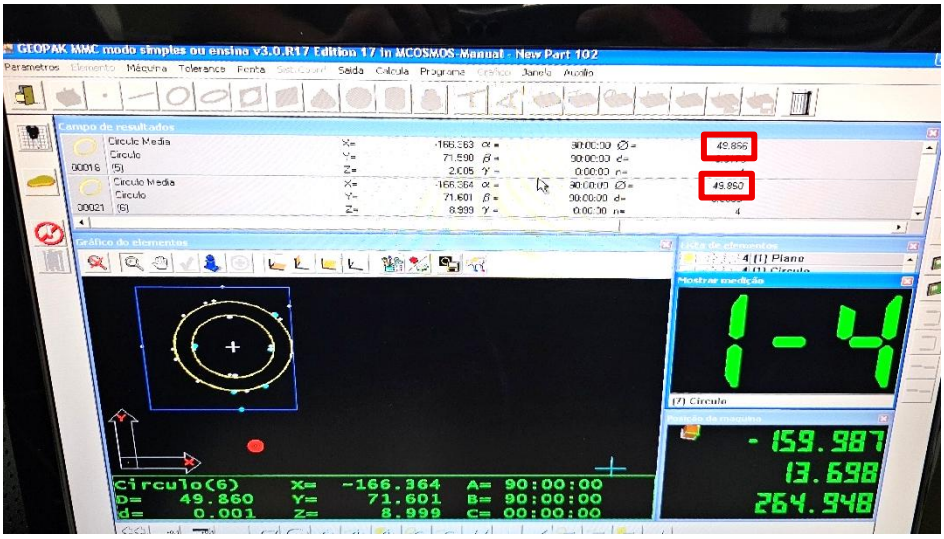


Figura 47:Visualização no monitor das medidas externas em H1 e H2.

Após os toques da probe ou apalpador, o software da MMC calculou automaticamente os diâmetros interno e externo correspondentes a cada altura, conforme mencionado no item 3.5. Os valores obtidos foram implementados e organizados conforme é apresentado na tabela 7.

Tabela 7:Valores medidos do CP 03.1. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 03.1	35,079	49,785	35,055	49,895	100	Linha

A NBR ISSO 2768-1 define tolerâncias gerais para dimensões lineares e

angulares, que se baseia na dimensão nominal e na classe de tolerância que foi definida como o “Grau Médio (m)”. Como as dimensões da série CP 03 até a série CP 06 se enquadram na faixa de dimensão nominal acima de 30 mm até 120 mm, tem-se como afastamento admissível, tolerância de ±0,3 mm. Isso significa que a dimensão real da peça pode estar até 0,3 mm acima ou 0,3 mm abaixo da dimensão nominal, ou seja, a variação total admissível de 0,6 mm, que é a diferença entre o limite superior e o limite inferior da tolerância.

Todos os corpos de provas da série CP 03 tiveram os diâmetros internos e externos medidos nas alturas definidas (H1 e H2), implementados e organizados conforme é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8: Valores obtidos da série CP 03. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 03.1	35,079	49,785	35,055	49,895	100	Linha
CP 03.2	35,031	49,878	35,131	49,858	100	Linha
CP 03.3	35,014	49,839	35,07	49,936	100	Linha

Ressalta-se que, considerando os valores obtidos em relação aos requisitos da Norma NBR ISO 2768-1 para tolerâncias gerais de Grau Médio (m), observa-se que todas as medidas estão dentro da tolerância de ± 0,3 mm.

Na Tabela 9, é apresentado uma sintetização dos resultados dimensionais da série CP 03 como a média da série, valores mínimos e máximos, amplitude da variação, desvio padrão e tolerância da norma.

Tabela 9: Resultados obtidos da série CP 03. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 03	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISO 2768
H1 D. Int.	35,041	35,014	35,079	35,079-35,014=0,065	0,041	0,6
H1 D. Ext.	49,834	49,785	49,878	49,878-49,785=0,093	0,166	0,6
H2 D. Int.	35,085	35,055	35,131	35,131-35,055=0,076	0,085	0,6
H2 D. Ext.	49,896	49,858	49,936	49,936-49,858=0,078	0,104	0,6

Ao comparar a amplitude da variação observada na série CP 03 com a variação total permitida pela NBR ISO 2768-1 (Grau Médio), todas as amplitudes das variações (0,065 mm; 0,093 mm; 0,076 mm; 0,078 mm) são significativamente menores do que a variação total admissível de 0,6 mm estabelecida pela norma para o Grau Médio.

Dando sequência a linha de pesquisa, seguiu-se com o mesmo procedimento de medição para a série CP 04, cujo percentual de preenchimento interno foi configurado

em 20%, mantendo-se o material PLA e o tipo de geometria de preenchimento como “linha”. Os valores obtidos podem ser observados na tabela 10.

Tabela 10: Valores obtidos da série CP 04. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 04.1	35,014	49,893	35,093	49,853	20	Linha
CP 04.2	35,069	49,906	35,094	49,866	20	Linha
CP 04.3	35,107	49,937	35,133	49,865	20	Linha

As medidas referentes à série CP 04 também revelaram boa observância à Norma ISSO 2768 para tolerâncias gerais de Grau Médio (m), mesmo com um percentual de preenchimento reduzido, a precisão dimensional das peças foi mantida dentro dos padrões estabelecidos pela Norma.

Conforme detalhado na tabela 11, os resultados dimensionais da série CP 04 são apresentados, abrangendo a média, os valores de mínimo e máximo, a amplitude da variação, o desvio padrão e a tolerância da norma.

Tabela 11: Resultados obtidos da série CP 04. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 04	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	35,063	35,014	35,107	35,107-35,014=0,093	0,063	0,6
H1 D. Ext.	49,912	49,893	49,937	49,937-49,893=0,044	0,088	0,6
H2 D. Int.	35,107	35,093	35,133	35,133-35,093=0,040	0,107	0,6
H2 D. Ext.	49,861	49,853	49,866	49,866-49,853=0,013	0,139	0,6

Novamente, foi possível observar que todos os valores de amplitude de variação obtidos para as peças da série CP 04 também são menores do que a variação total admissível de 0,6 mm, conforme a NBR ISO 2768-1, Grau Médio (m), para as faixas de dimensões nominais em questão.

Assim sendo, considerando os resultados obtidos para as séries CP 03 e 04, pode-se notar que, independentemente do percentual de preenchimento, o processo de fabricação é capaz de produzir peças que atendem o requisito de tolerância geral para as dimensões analisadas. Ou seja, os resultados de ambas as séries, CP 03 e 04, atestam conformidade com a NBR ISO 2768-1 Grau Médio, consequentemente, na questão dimensional, elas atendem o requisito esperado.

Para a produção das séries CP 05 e CP 06, utilizou-se a geometria “grade” na configuração do tipo de preenchimento interno. Entretanto, o percentual do preenchimento foi mantido em 20%, uma vez que se mostrou particularmente mais

crítico nas comparações anteriores entre as séries CP 03 e CP 04. Desse modo, os valores obtidos da série CP 05, visíveis na Tabela 12, correspondem às medidas obtidas para os CPs produzidos com 20% de preenchimento e tipo de geometria “grade”.

Tabela 12: Valores obtidos da série CP 05. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 05.1	35,093	49,900	35,089	49,889	20	Grade
CP 05.2	35,106	49,878	35,139	49,850	20	Grade
CP 05.3	35,095	49,904	35,145	49,875	20	Grade

Assim sendo, é possível observar que todas as medidas ficaram dentro dos limites especificados pela norma, atentando que a precisão dimensional das peças produzidas sob essas configurações atende às especificações pretendidas.

Do mesmo modo, na tabela 13 é apresentado uma síntese dos resultados dimensionais da série CP 05, como média da série, valores máximos, mínimos, amplitude de variação e desvio-padrão para cada medida.

Tabela 13: Resultados obtidos da série CP 05. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 05	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	35,098	35,093	35,106	35,106−35,093=0,013	0,007	0,6
H1 D. Ext.	49,894	49,878	49,904	49,904−49,878=0,026	0,014	0,6
H2 D. Int.	35,124	35,089	35,145	35,145−35,089=0,056	0,031	0,6
H2 D. Ext.	49,871	49,850	49,889	49,889−49,850=0,039	0,020	0,6

Ao analisar os resultados obtidos, pode-se notar que, para a série CP 05, as amplitudes de variação para todas as medidas (H1 D. Int.: 0,013 mm; H1 D. Ext.: 0,026 mm; H2 D. Int.: 0,056 mm; H2 D. Ext.: 0,039 mm) são significativamente menores do que o limite de 0,6 mm da norma. Isso ratifica que as peças da série CP 05 estão seguramente em conformidade com as tolerâncias gerais de Grau Médio da NBR ISO 2768-1, demonstrando que a alteração do tipo da geometria de preenchimento para "grade" permite a produção de peças com maior precisão dimensional em relação aos outros tipos de geometria de preenchimento.

Neste sentido, ambas as séries CP 04 e CP 05 correspondem plenamente ao atendimento da norma, no entanto, ao analisar o quesito da consistência dimensional (variabilidade), a série CP 05 demonstrou ser melhor do que a série CP 04 para as condições verificadas. Os desvios-padrão da série CP 05 são menores em todas as medidas, indicando que a geometria de preenchimento “grade" resultou em peças que

podem garantir maior repetibilidade quando produzidas em série.

No procedimento para produção da série 06, a geometria do tipo de preenchimento foi alterada para “giróide” e os valores obtidos podem ser observados na tabela 14.

Tabela 14: Valores obtidos da série CP 06. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 06.1	35,015	49,933	35,108	49,879	20	Giróide
CP 06.2	35,097	49,913	35,173	49,874	20	Giróide
CP 06.3	35,116	49,924	35,185	49,899	20	Giróide

Comparando os valores obtidos com os requisitos estipulados pela Norma NBR ISSO 2768-1 para tolerâncias gerais de Grau Médio (m), verifica-se que a série CP 06 continua a atender aos padrões desejados.

Na tabela 15, é apresentado a compilação dos resultados dimensionais da série CP 06, exibindo a média, os valores mínimos e máximos, a amplitude da variação, o desvio padrão de tolerância exigidos de acordo com a norma.

Tabela 15: Resultados obtidos pela série CP 06. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 06	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	35,076	35,015	35,116	0,101	0,052	0,6
H1 D. Ext.	49,923	49,913	49,933	0,020	0,010	0,6
H2 D. Int.	35,155	35,108	35,185	0,077	0,041	0,6
H2 D. Ext.	49,884	49,874	49,899	0,025	0,013	0,6

Deste modo, embora os resultados para a série CP 06 também apresentem boa conformidade e desvios-padrão menores que os da série CP 04 para os diâmetros externos em H1 e H2, em comparação com os da série CP 05, houve uma variabilidade ligeiramente maior em relação aos diâmetros internos para as alturas H1 e H2.

Comparando com a série CP 03, tanto a série CP 04, série CP 05 quanto a série CP 06, que utilizam 20% de preenchimento, confirmam que a redução do percentual de preenchimento não comprometeu a conformidade com a norma. De fato, a série CP 05 superou a série CP 03 em termos de consistência dimensional geral, com desvios-padrão menores na maioria das medições. A série CP 06 também se mostrou mais consistente que a CP 03 em algumas dimensões, diâmetros externos nas alturas H1e H2, mas com menos consistência nos diâmetros internos em H1 e H2.

Em síntese, apesar de todas as configurações serem adequadas para atender

às tolerâncias da NBR ISO 2768-1, a série CP 05 emerge como a mais otimizada em termos de estabilidade e repetibilidade dimensional, seguida de perto pela CP 06, que também oferece bom desempenho com menor uso de material.

Visando à ampliação do escopo deste estudo, as dimensões do corpo de prova padrão foram reduzidas à metade, permitindo que os resultados fossem avaliados em uma nova faixa de tolerância acima de 6 mm até 30 mm. O material PLA foi mantido e o processo de fabricação seguiu metodologia similar à empregada na produção dos CPs anteriores.

Para esta nova série, denominada CP 07, o preenchimento interno foi definido em 100%, com a aplicação da geometria “giróide”, escolha que foi motivada por ser uma opção intermediária entre o tipo “linha” e “grade” de acordo com quesitos que envolvem a média entre as séries. Os valores coletados para a série CP 07 estão sumarizados na tabela 16.

Tabela 16: Valores obtidos da série CP 07. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 07.1	17,559	24,986	17,553	25,036	100	Giróide
CP 07.2	17,553	24,949	17,646	25,010	100	Giróide
CP 07.3	17,585	24,932	17,586	25,053	100	Giróide

Todos os valores obtidos estão abaixo do limite de 0,4 mm estabelecido pela norma. Isso significa que as peças da série CP 07, demonstram conformidade com a Norma NBR ISSO 2768-1 para a faixa estudada, reiterando a capacidade do processo em manter a precisão dimensional mesmo com os corpos de provas reduzidos.

Conforme detalhado na tabela 17, os resultados dimensionais da série CP 07 são apresentados, abrangendo a média, os valores de mínimo e máximo, a amplitude da variação, o desvio padrão e a tolerância da norma.

Tabela 17: Resultados da série CP 07. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 07	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	17,566	17,553	17,585	0,032	0,016	0,4
H1 D. Ext.	24,956	24,932	24,986	0,054	0,027	0,4
H2 D. Int.	17,595	17,553	17,646	0,093	0,047	0,4
H2 D. Ext.	25,033	25,010	25,053	0,043	0,022	0,4

Com as dimensões reduzidas a metade, os resultados da série CP 07 demonstram conformidade com a NBR ISO 2768-1 para o Grau Médio. A norma

estabelece uma tolerância total de 0,4 mm (±0,2 mm) para esta faixa. As amplitudes de variação das medidas da série CP 07 (entre 0,032 mm e 0,093 mm) são substancialmente menores que o limite de 0,4 mm requisitado pela norma. Isso significa que a dispersão dimensional das peças é significativamente mais controlada do que o exigido pelo padrão. Mesmo com a redução das dimensões pela metade e a aplicação do preenchimento “giroide” a 100%, O processo de fabricação conseguiu manter a precisão dimensional. A baixa variabilidade e a folga em relação à tolerância da norma indicam a robustez do método empregado para garantir a qualidade dimensional das peças.

Na próxima etapa, adotou-se para a série do CP 08, o preenchimento de 20% e manteve o tipo de geometria de preenchimento em giróide em relação a série CP 07. Os valores obtidos da série CP 08 constam na tabela 18.

Tabela 18: Valores obtidos da série CP 08. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 08.1	17,574	24,981	17,629	24,996	20	Giróide
CP 08.2	17,586	25,009	17,618	24,978	20	Giróide
CP 08.3	17,578	25,015	17,666	24,950	20	Giróide

Os valores dimensionais coletados para a série CP 08, conforme apresentado na tabela 19, demonstram compatibilidade com os requisitos da Norma NBR ISO 2768-1 para o Grau Médio (m). Todas as medições dos diâmetros internos e externos se enquadram na faixa de 6 mm a 30 mm da norma. Os resultados da série CP 08 podem ser vistos na tabela 19:

Tabela 19: Resultados da série CP 08. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 08	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	17,579	17,574	17,586	0,012	0,006	0,4
H1 D. Ext.	25,002	24,981	25,015	0,034	0,018	0,4
H2 D. Int.	17,638	17,618	17,666	0,048	0,025	0,4
H2 D. Ext.	24,975	24,950	24,996	0,046	0,023	0,4

Os resultados da série CP 08 evidenciam conformidades com a Norma NBR ISO 2768-1 (Grau Médio) para a faixa de 6 mm a 30 mm. As amplitudes de variação observadas (entre 0,012 mm e 0,048 mm) são menores que a tolerância de 0,4 mm estabelecida pela norma, atestando que a precisão dimensional das peças está dentro expectativa.

Em comparação com a série CP 07, que também utilizou as dimensões reduzidas, a série CP 08 exibiu uma consistência dimensional para a maioria das medidas. Os desvios-padrão da série CP 08 foram menores para H1 D. Int., H1 D. Ext. e H2 D. Int., indicando que, para esses corpos de prova menores e com preenchimento do tipo giroide, a densidade de 20% resultou em uma uniformidade de medidas ligeiramente melhor que a de 100% de preenchimento.

A pesquisa se encadeou na aquisição de dados com o material ABS, para averiguar o comportamento dimensional do material dos CPs impressos com as mesmas variações de preenchimento (20% e 100%) e os mesmos tipos de geometria (linha, grade e giroide), cujos resultados foram computados a partir das séries CP 20 à CP 23, considerando os mesmos procedimentos realizados nas séries de CPs anteriores, referentes ao material PLA.

Dando prosseguimento, foram feitos os corpos de prova da série CP 20, com material ABS e com 100% de preenchimento, e também com a manutenção do tipo de geometria de preenchimento, como podem ser vistos na tabela 20.

Tabela 20: Valores obtidos da série CP 20. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 20.1	34,839	49,899	34,634	49,968	100	Giróide
CP 20.2	34,939	49,814	34,631	50,064	100	Giróide
CP 20.3	34,792	49,869	34,442	50,140	100	Giróide

As medidas obtidas para a série CP 20, impressa em ABS com 100% de preenchimento e geometria do tipo giróide, apresenta diâmetros internos e externos que se enquadram na tolerância exigida na faixa de 30 mm a 120 mm da norma. Para essa faixa, a NBR ISO 2768-1 (Grau Médio) permite uma variação total de 0,6 mm (±0,3 mm). Os resultados adquiridos dos diâmetros internos e externos nas alturas H1 e H2, podem ser vistos na tabela 21.

Tabela 21: Resultados dos valores da série CP 20. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 20	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	34,857	34,792	34,939	0,147	0,075	0,4
H1 D. Ext.	49,860	49,814	49,899	0,085	0,043	0,4
H2 D. Int.	34,569	34,442	34,634	0,192	0,110	0,4
H2 D. Ext.	50,057	49,968	50,140	0,172	0,086	0,4

Assim como a série CP 03 atendeu às tolerâncias, a série CP 20 também se

enquadrou dentro das tolerâncias da NBR ISO 2768-1, apesar dos corpos de provas serem produzidos com diferentes materiais. A principal divergência reside nas características dimensionais intrínsecas dos materiais e na interação com a geometria de preenchimento, tendo em vista que a série CP 20 tende a apresentar maior contração, resultando em dimensões absolutas menores.

Deste modo, a combinação ABS com preenchimento do tipo “giroide” da série CP 20 pode oferecer maior consistência para diâmetros externos, enquanto a série CP 03 pode ser mais consistente para diâmetros internos, em condições de 100% de preenchimento. Contudo, a série CP 20 tendeu a apresentar diâmetros internos médios ligeiramente menores do que a série CP 03. Essa diferença pode ser atribuída à maior taxa de contração característica do material ABS durante o resfriamento.

Em seguida, a série CP 21 apresenta apenas uma alteração no percentual de preenchimento no total de 20%, mantendo o tipo de geometria como giroide e material ABS. Pode-se notar os valores obtidos por meio das medições na tabela 22.

Tabela 22: Valores obtidos da série CP 21. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 21.1	34,987	49,821	34,772	50,184	20	Giróide
CP 21.2	34,903	49,867	34,693	50,023	20	Giróide
CP 21.3	34,928	49,921	34,662	50,022	20	Giróide

Assim como os CPs das séries 04, 05 e 06, os diâmetros da série CP 21 se enquadram na faixa de 30 mm a 120 mm da NBR ISSO 2768-1. Para essa faixa, a norma permite uma variação total de 0,6 mm (±0,3 mm).

A série CP 21 demonstrou maior consistência para os diâmetros internos (H1 D. Int. e H2 D. Int.) em comparação com a série CP 20. Por outro lado, a série CP 20 apresentou uma consistência ligeiramente superior para os diâmetros externos (H1 D. Ext. e H2 D. Ext.). Os resultados com as médias, valores mínimos e máximos, amplitude de variação e desvio-padrão, podem ser notados na tabela 23.

Tabela 23: Resultados obtidos da série CP 21. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 21	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	34,939	34,903	34,987	0,084	0,044	0,4
H1 D. Ext.	49,869	49,821	49,921	0,100	0,050	0,4
H2 D. Int.	34,709	34,662	34,772	0,110	0,058	0,4
H2 D. Ext.	50,076	50,022	50,184	0,162	0,093	0,4

Deste modo, é possível observar que as dimensões médias da série CP 21 tenderam a ser ligeiramente maiores em comparação com a série CP 20, um comportamento possivelmente esperado, pois menor densidade de preenchimento geralmente resulta em menor contração geral da peça durante o resfriamento.

Os dados obtidos para a série CP 22, na qual, adotou-se um preenchimento interno de 100% e geometria do tipo giroide, foram compilados e apresentados na tabela 24.

Tabela 24: Valores obtidos da série CP 22. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 22.1	17,611	24,986	17,487	24,982	100	Giróide
CP 22.2	17,598	24,975	17,468	25,030	100	Giróide
CP 22.3	17,554	25,028	17,558	24,995	100	Giróide

Neste caso, os valores da série CP 22 se enquadram na faixa de 6 mm a 30 mm da NBR ISO 2768-1 para o Grau Médio, a qual norma estabelece uma variação total de 0,4 mm para essa faixa.

Os resultados em relação as médias da série, valores mínimos e máximos, amplitude de variação e desvio-padrão são mostrados na tabela 25.

Tabela 25: Resultados obtidos da série CP 22. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 22	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	17,5877	17,554	17,611	0,057	0,029	0,4
H1 D. Ext.	24,996	24,975	25,028	0,053	0,027	0,4
H2 D. Int.	17,504	17,468	17,558	0,090	0,047	0,4
H2 D. Ext.	24,999	24,982	25,030	0,048	0,024	0,4

A série CP 22 apresentou desvios-padrão um pouco maiores em todas as medições de diâmetro em relação à série CP 08.

Finalmente os valores dimensionais coletados para a série designada como CP 23, a qual possui característica de preenchimento interno de 20% e a manutenção do tipo de geometria como giróide, estão exibidos na tabela 26.

Tabela 26: Valores obtidos da série CP 23. Fonte: Autor.

Codificação	H1		H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 23.1	17,583	24,868	17,536	24,834	20	Giróide
CP 23.2	17,633	24,874	17,578	24,898	20	Giróide

CP 23.3	17,605	24,920	17,580	24,894	20	Giróide

Novamente, as medidas dos corpos de prova da série CP 23 estão em conformidade com a faixa dimensional de 6 mm a 30 mm da Norma NBR ISSO 2768-1, para a qual o Grau Médio (m), a qual estabelece uma tolerância de ± 0,2 mm, totalizando uma variação admissível de 0,4 mm.

Os resultados da série CP 23 como a média, valores máximo e mínimo, amplitude de variação, desvio-padrão e tolerância da norma, podem ser vistos na tabela 27.

Tabela 27: Resultados obtidos da série CP 23. Fonte: Autor.

Medida	Média da série CP 23	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Amplitude da Variação (mm)	Desvio-Padrão (mm)	Tolerância NBR ISSO 2768
H1 D. Int.	17,607	17,583	17,633	0,050	0,025	0,4
H1 D. Ext.	24,887	24,868	24,920	0,052	0,028	0,4
H2 D. Int.	17,564	17,536	17,580	0,044	0,025	0,4
H2 D. Ext.	24,875	24,834	24,898	0,064	0,036	0,4

A série CP 23 demonstrou boa consistência para os diâmetros internos (H1 D. Int. e H2 D. Int.), com desvios-padrão de 0,025 mm para ambas as medições. Já a série CP 22 (100% de preenchimento) foi ligeiramente mais consistente para os diâmetros externos (H1 D. Ext. e H2 D. Ext.), com desvios-padrão de 0,027 mm e 0,024 mm, respectivamente.

A série CP 08 demonstrou uma consistência levemente superior para a maioria das medições em comparação com a série CP 23. O desvio-padrão da CP 08 para H1 D. Int. (0,006 mm) e H1 D. Ext. (0,018 mm) é menor que o da CP 23 (0,025 mm e 0,028 mm, respectivamente).

Com os dados e resultados obtidos pelas séries, fez-se interessante compilar as informações em função de gráficos para melhor visualização do comparativo entre as séries. Portanto, a partir desses gráficos, é possível observar o desempenho da consistência da variação entre diâmetros internos e externos, uma comparação relacionada a média dos valores de diâmetros das séries e as dimensões nominais dos CPs, um comparativo entre os desvios-padrão das séries e, por fim, verificar o melhor desempenho dimensional relacionado às diferentes formas de geometria para o parâmetro preenchimento (densidade).

Com isso, as consistências dimensionais em relação ao desvio padrão relacionada ao diâmetro interno, nas alturas H1 e H2 de todas as séries que podem ser observadas na figura 48.

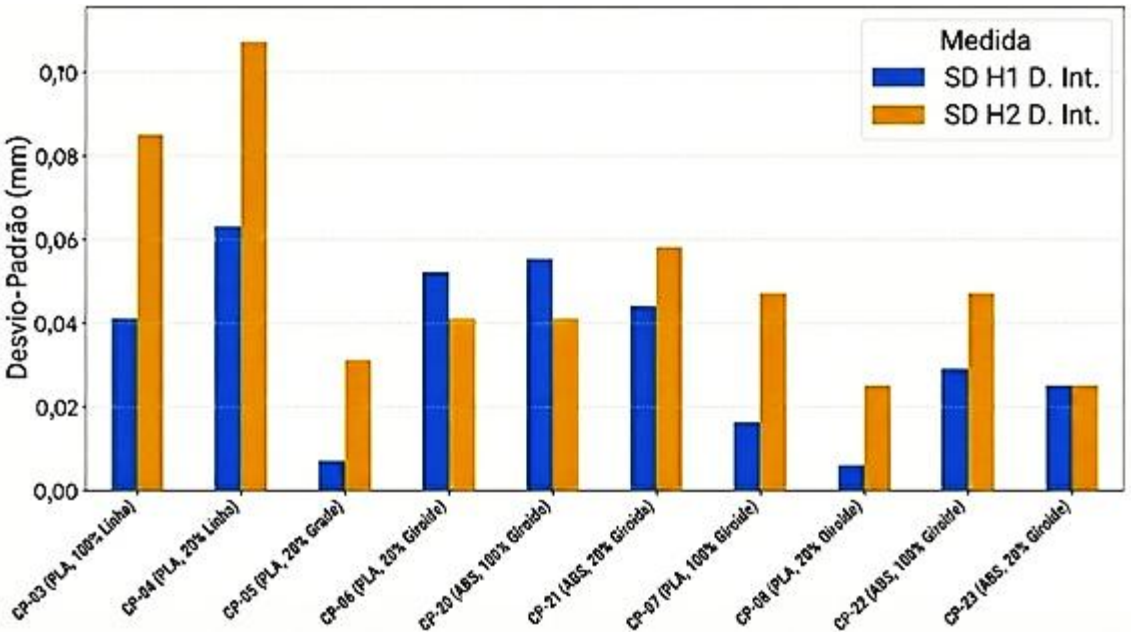


Figura 48: Consistência dimensional do diâmetro interno de todas as séries. Fonte: Autor.

Deste modo os modelos reduzidos, feitos com material PLA com 20% de preenchimento e tipo giróide na geometria de preenchimento (série CP 08) obteve menor desvio padrão tanto nas alturas H1 (distância de 1 mm da base do CP) quanto em H2 (distância de 8 mm da base do CP). A série do modelo reduzido, material ABS com 20% preenchimento, tipo Giróide (série CP 23) em H2, ficou equivalente a série CP 08. A série do modelo padrão, material PLA com 20% preenchimento, tipo Grade (série CP 05) obteve mesmo desvio-padrão que a série CP 08 na altura H1, mas na altura H2, comparando com CP 23, o desvio padrão ficou ligeiramente maior. É interessante observar que nas séries CP 05, CP 07 e CP 08 mesmo perto do possível erro da pata de elefante, as consistências dimensionais estão abaixo de 0,02 mm.

Também pode-se observar as consistências dimensionais em relação ao desvio padrão relacionada ao diâmetro externo, nas alturas H1 e H2 de todas as séries, que pode ser notado na figura 49.

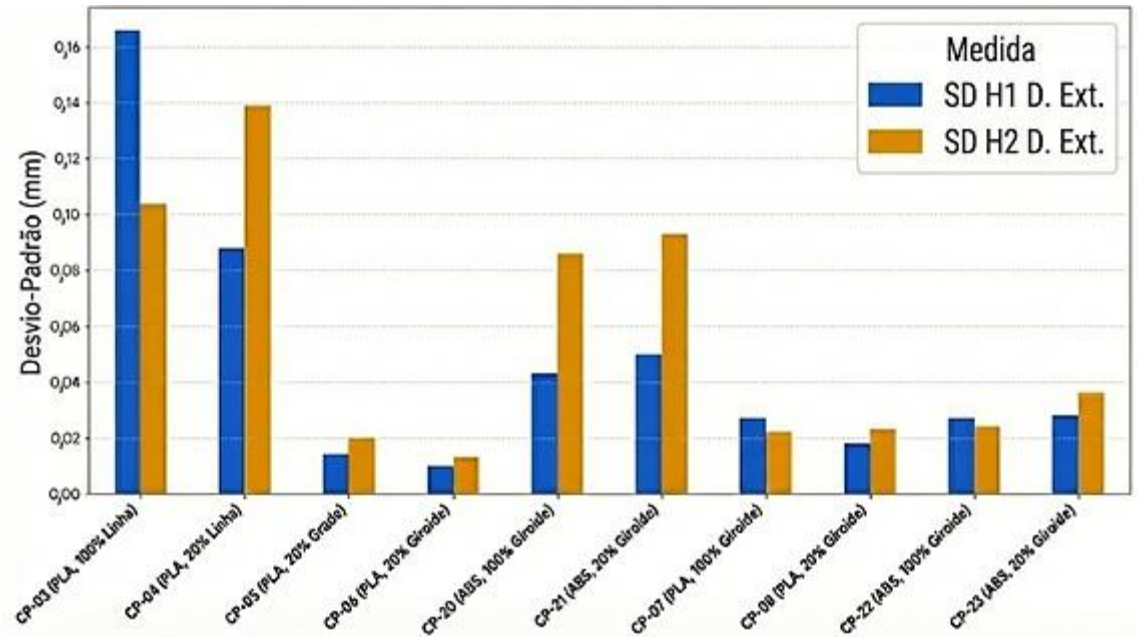


Figura 49: Consistência dimensional do diâmetro externo de todas as séries. Fonte: Autor.

Desta maneira, para diâmetros externos, os CPs padrão feitos com material PLA, percentual de preenchimento de 20% e tipo de geometria Giróide (série CP 06), obteve menor desvio-padrão tanto na altura H1 quanto na altura H2, com valores inferiores a 0,02 mm. O modelo padrão feitos com material PLA, percentual de preenchimento de 20% e tipo de geometria Grade (série CP 05), apesar dos valores não serem os menores, tanto nas alturas H1 e H2 os valores do desvio-padrão ficaram abaixo de 0,02 mm. As séries CP 07 (modelo padrão, material PLA, preenchimento 100% e tipo de preenchimento Giróide), CP 08 (modelo padrão, material ABS, preenchimento 20% e tipo de preenchimento Giróide), CP 22 (modelo reduzido, material ABS, preenchimento 100% e tipo de preenchimento Giróide) e finalmente CP 23 (modelo reduzido, material ABS, preenchimento 20% e tipo de preenchimento Giróide) obtiveram os resultados inferiores a 0,04 mm, tanto na altura H1 quanto na H2.

Adicionalmente é possível notar no gráfico de dispersão que contém as séries com o modelo padrão de CP, nas alturas H1 e H2, que está representado na figura 50.

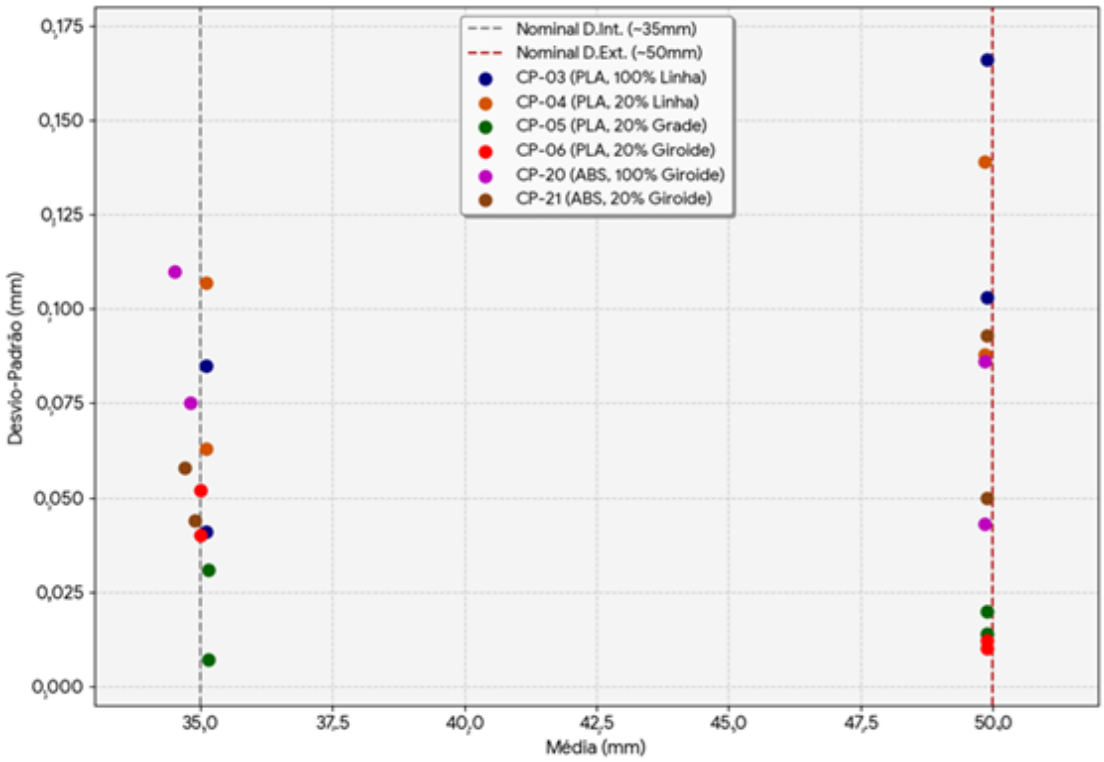


Figura 50: Média das séries em relação aos desvios-padrão – CPs padrão. Fonte: Autor.

A série do modelo padrão de material PLA com preenchimento de 20% e do tipo Giróide (Série CP 06) apresentou o melhor comportamento em relação ao desvio-padrão e à média para o diâmetro externo. A série do modelo padrão de material PLA com preenchimento de 20% e do tipo Grade (Série CP 05) apresentou o melhor comportamento em relação ao desvio padrão e à média para o diâmetro interno, sendo que, para o diâmetro externo, o comportamento foi praticamente equivalente ao CP 06, o que possibilita considerar a série CP 05 como uma escolha menor do que a série CP 06.

Da mesma forma, o gráfico de dispersão que abrange as séries com o modelo reduzido de CP, nas alturas H1 e H2, que são mostrados na figura 51.

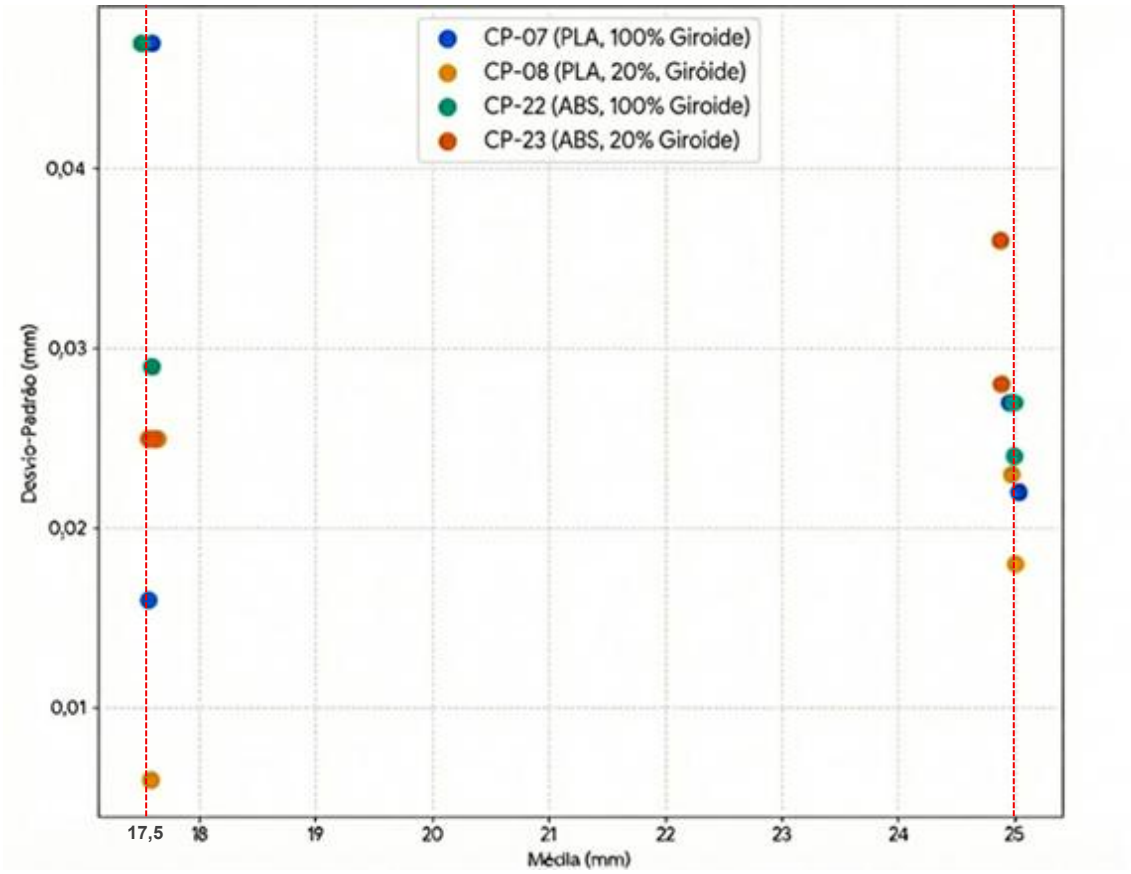


Figura 51: Média das séries em relação aos desvios-padrão – CPs reduzidos. Fonte: Autor.

Por consequência, a série do modelo reduzido de material PLA com preenchimento de 20% e do tipo Giróide (Série CP 08) apresentou o melhor comportamento tanto para os diâmetros externos e internos. A série do modelo reduzido de material PLA com preenchimento de 100% e do tipo Giróide (Série CP 07) pode ser considerado como um comportamento quase tão bom quanto a série CP 08.

De um modo geral, é possível observar na figura 50 que a série dos CPs do modelo padrão obtiveram os valores das médias dos diâmetros externos mais próximos aos valores nominais, o que também se ratifica para os diâmetros internos. Adicionalmente, observando a figura 51, pode-se dizer que para os CPs com modelos reduzidos, as médias apresentaram menor dispersão em relação aos valores nominais tanto para os diâmetros externos quanto internos.

Pode-se destacar a série CP 08 (PLA, 20% Giroide) por ter seus pontos mais próximos ao eixo Y (baixa variabilidade) em relação às outras séries, demonstrando que é a que oferece o melhor equilíbrio entre precisão e consistência. Estes gráficos são ideais para visualizar tendências, pois as linhas mais próximas do eixo da abscissa indicam melhores consistências.

Outro tipo de gráfico para analisar é do tipo linha que possui a comparação dos

modelos padrão de CP em relação ao desvio-padrão, que pode ser visto na figura 52.

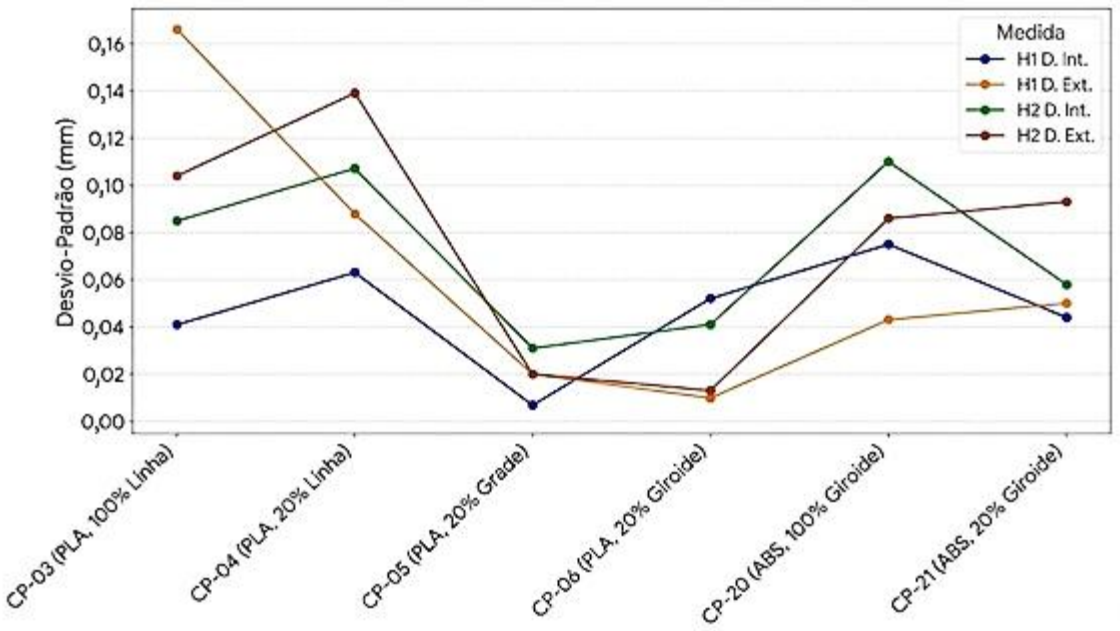


Figura 52: Comparação do desvio-padrão das séries CP padrão. Fonte: Autor.

Observando o gráfico da figura 52, nota-se a série do modelo padrão de material PLA com preenchimento de 20% e do tipo Grade (Série CP 05) apresentou um melhor resultado considerando ambos os diâmetros externos e internos, seguido pela série do modelo padrão de material PLA com preenchimento de 20% e do tipo Giróide (Série CP 06).

Já para as peças reduzidas, que podem ser vistas no gráfico da figura 53, com as alturas H1 e H2 e seus respectivos diâmetros internos e externos.

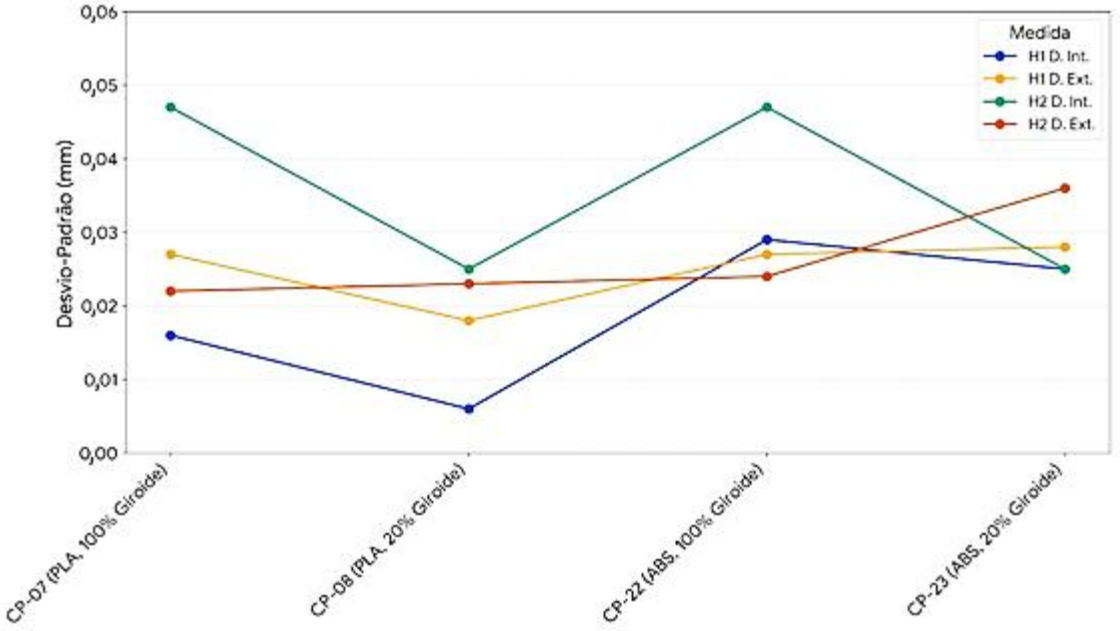


Figura 53: Comparação do desvio-padrão das séries CPs reduzidos. Fonte: Autor.

Observa-se na figura 53, se for considerado um limiar de 0,04 para o desvio-padrão, pode-se dizer que o modelo reduzido, de material PLA, de preenchimento de 20% e do tipo Giróide, a série CP 08 apresentou um melhor resultado para ambos os diâmetros externos e internos, seguido pelo CP 23. A linha da série CP 08 (PLA, 20% Giroide) é a que permanece mais baixa na maioria das medições, indicando que é a mais consistente.

Conforme pode ser visto o gráfico de barras resume todos os dados relacionados com as médias do desvio-padrão pela classificação do tipo de preenchimento, presentes na figura 54.

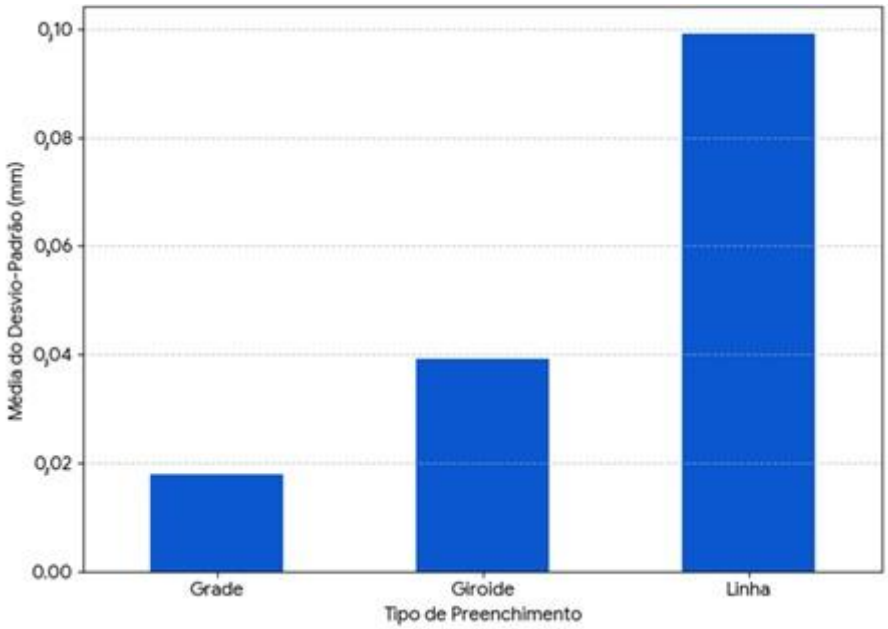


Figura 54: Média do desvio-padrão por tipo de preenchimento. Fonte: Autor.

Neste modo, a média do desvio-padrão para o tipo de preenchimento “grade” apresenta o melhor resultado, seguido pelo tipo de preenchimento “giróide”. Entretanto, é importante ressaltar que ambos obtiveram a média dos valores de desvio-padrão abaixo de 0,04mm.

É possível observar também um comportamento distinto em relação à densidade de preenchimento. A redução da densidade de 100% para 20% mostrou-se uma estratégia eficaz para otimizar a precisão dos diâmetros internos (furos). Este fenômeno pode ser atribuído à dinâmica de dissipação térmica e contração volumétrica dos polímeros. Peças totalmente sólidas (100% de preenchimento) acumulam maior energia térmica, prolongando o tempo de resfriamento e aumentando as tensões residuais internas. Conforme apontado na literatura Sood, *et al.*, (2010); Turner, *et al.*, (2014), o excesso de material provoca uma contração mais acentuada ('*shrinkage*'),

que tende a puxar as paredes internas em direção ao centro da massa, reduzindo o diâmetro efetivo dos furos. Em contrapartida, para os diâmetros externos, a configuração maciça (100%) manteve uma leve vantagem na consistência dimensional, beneficiando-se da rigidez estrutural superior.

Por fim, a definição das dimensões geométricas dos Corpos de Prova (CPs) exploradas neste trabalho não foi arbitrária, mas sim fundamentada em uma relação direta com as faixas de medidas e tolerâncias estipuladas pela norma ISO NBR 2768. Uma vez que estes mesmos parâmetros normativos foram empregados no projeto e fabricação do VSA, assegurou-se uma estrita congruência entre os ensaios realizados e a aplicação final no veículo. Tal alinhamento garante a representatividade dos dados obtidos, validando a avaliação e consolidando a pertinência dos resultados para esta linha de pesquisa.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que, independentemente da configuração de preenchimento testada, o processo de fabricação via impressão 3D (FFF) pode ser uma opção a ser considerada na produção em série de peças com capacidade de atender a requisitos de engenharia, tendo em vista que todas as séries de corpos de prova apresentaram conformidades com as tolerâncias gerais estabelecidas pela norma NBR ISO 2768-1 (Grau Médio), ou seja, que as variações dimensionais mantiveram-se consistentemente abaixo do limite de 0,6 mm, evidenciando a robustez do processo de fabricação.

No que tange à geometria de preenchimento, a alteração do padrão Linha para Grade, mantendo a densidade em 20%, resultou em um impacto positivo significativo na estabilidade dimensional. A série CP 05 (Grade) apresentou menor dispersão de medidas e desvios-padrão inferiores em comparação à série CP-03 (Linha). Isso sugere que a geometria em grade oferece uma estrutura interna mais estável, distribuindo melhor as tensões de resfriamento e otimizando a repetibilidade do processo.

Para os diâmetros internos (H1 D. Int. e H2 D. Int.), a série CP 21 demonstrou maior consistência (desvios-padrão menores) do que a CP 20. Isso sugere que, para o ABS com preenchimento Giroide, uma menor densidade pode otimizar a uniformidade em furos. Por outro lado, para os diâmetros externos (H1 D. Ext. e H2 D. Ext.), a série CP 20 mostrou uma consistência levemente superior à da CP 21.

Com base nos resultados apresentados nesta dissertação, conclui-se que existe possibilidade de produzir peças empregadas como produto final, em série, fabricadas por Impressão 3D utilizando máquina de baixo custo e materiais de fácil obtenção, cujas dimensões estejam de acordo com a tabela de tolerância Norma NBR ISO 2768 Grau Médio. Portanto, a utilização dessas peças feitas por manufatura aditiva em estruturas mecânicas de veículos autônomos pode ser de grande valia na construção desse equipamento

A análise específica das séries de ABS com preenchimento Giroide (CP 20 vs. CP 21) corroborou essa tendência: a série com menor densidade (CP 21) obteve maior consistência nos diâmetros internos, enquanto a série mais densa (CP 20) foi ligeiramente superior nos externos. Logo, recomenda-se atenção à conversão dos arquivos digitais, adotando configurações personalizadas na geração do arquivo STL para mitigar perdas dimensionais na escala de centésimos.

Todos as séries dos corpos de prova ficaram compatíveis em suas respectivas nas faixas de tolerância de cada amostra (CPs) que a Norma ISO 2768 orienta, podendo ser aplicadas em VSAs.

Adicionalmente, os resultados ratificam as observações de Ahn, *et al.* (2002), confirmando que o ABS apresenta uma taxa de compressão e contração térmica superior ao PLA. As peças maciças, ao sofrerem maior expansão térmica durante a deposição e subsequente contração no resfriamento, tendem a apresentar desvios mais acentuados: aumento do diâmetro externo e redução do interno.

Conclui-se, portanto, que é viável a produção em série de componentes finais utilizando impressoras 3D de baixo custo e materiais acessíveis, respeitando as tolerâncias da NBR ISO 2768 (Grau Médio). Tais peças validam a aplicação da MA na construção de estruturas mecânicas para Veículos Submarinos Autônomos (VSAs), oferecendo uma alternativa funcional e economicamente eficiente.

5.1Trabalho Futuros

Apesar das medidas encontradas respeitarem a Norma NBR ISO 2768 - Grau Médio, ainda é possível obter valores mais próximos aos valores nominais das dimensões compensando, por exemplo, os erros sistemáticos durante a modelagem tridimensional dos CP's. Desta forma, visando atender a Norma NBR ISO 2768 - Grau Fino, é válido ampliar a pesquisa avaliando outros materiais e outros parâmetros de impressão. Também é interessante acrescentar aos estudos posteriores avaliações dimensionais referentes a outras formas geométricas.

Tendo em vista aplicações subaquáticas, também será interessante realizar uma pesquisa sobre o comportamento dessas peças fabricadas por impressão 3D em condições hiperbáricas.

Outra vertente que pode ser explorada para investigações futuras reside na análise de técnicas de pós-processamento, tais como o tratamento térmico (*annealing*) para alívio de tensões residuais e o alisamento químico (vapor de acetona ou revestimentos epóxi). O objetivo seria avaliar a eficácia desses métodos na redução da porosidade superficial, garantindo maior estanqueidade das peças e proteção contra a absorção de água em missões de longa duração.

Considerando a aplicação naval, pode-se propor o estudo dos efeitos da rugosidade superficial característica da MA (camadas de impressão) na hidrodinâmica do veículo. Ensaios em tanque de provas poderiam quantificar o coeficiente de arrasto dessas superfícies em comparação com peças lisas. Além disso, seria pertinente investigar a propensão dessas texturas à bioincrustação (*biofouling*) e o impacto disso na performance do VSA ao longo do tempo.

Por fim, recomenda-se a realização de ensaios de fadiga e fluência (*creep*) nos polímeros envelhecidos, para compreender melhor a vida útil dos componentes sob carregamento cíclico em ambiente salino, complementando a análise estática realizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D LAB. **3D LAB**, 2020. Disponivel em: https://3dlab.com.br/stringing-como-resolver/?srsltid=AfmBOopStwl_4GVSS4Donl51OKVPlOpobhhms8rpudLfhXq2NrlS4wjW. Acesso em: 16 out. 2024.

3D Natives. **3D Natives**, 2023. Disponivel em: https://www.3dnatives.com/es/efecto-pie-elefante-impresion-3d-fdm-080520232/#! Acesso em: 16 out. 2024.

3DLAB. Os 20 erros de impressão mais comuns e como resolvê-los. **3DLAB**, 2021. Disponivel em: https://3dlab.com.br/20-principais-erros-de-impressao/. Acesso em: 14 nov. 2024.

ABEYKOON, C.; SRI-AMPHORN, P.; FERNANDO, A. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, 30 mar. 2020., p. 284-297 Disponivel em: https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-lightweight-materials-and-manufacture.

ADNAN, W. H.; *et al*. Drone Use in Military and Civilian Application: Risk to National Security. **Journal of Media and Information Warfare**, v. 15(1), 2022., p. 60-70

AHN, H. *et al.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, 8, n. 4, 2002., p. 248–257

AHN, S.; *et al.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid prototyping journal**, 2002.

ALL3DP. 3D Printing: Elephant's Foot – Easy Fixes, 2021. Disponivel em: https://all3dp.com/2/elephant-s-foot-3d-printing-problem-easy-fixes/. Acesso em: 21 nov. 2024.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. **J. Mater. Process. Technol.**, 118, n. 1-3, 2001., p. 385-388 Disponivel em: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3.

AWD ALLAH, M.; *et al*. Crashworthiness Performance of Bamboo-Inspired 3D-Printed Tubes: Effects of Infill Pattern, Infill Ratio, Wall Thickness, and Inner Diameter. **Biomimetics**, 10, n. 10, 2024., p. 702

AZEVEDO, D. M. Conceito de Operação dos Veículos Submarinos Autónomos SeaCon a partir dos Submarinos da Classe Tridente. **Dissertação de Mestrado, Escola Naval**, 2013.

BAILEY, P.; JONES, T.; WILLIAMS, M. Advances in Magnetic Sealing Technologies for Subsea Applications. **Ocean Engineering**, 2021.

BANDYOPADHYAY, A. *et al.* Additive manufacturing of metallic and ceramic components for marine and space applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 96(5), 2018., p. 1983-2001

BÁRTOLO, J. Virtual Prototyping & Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. **CRC Press**, 2011.

BERARDI, F. B.; *et al*. Dimensional Evaluation of Additively Manufactured Parts for Autonomous Vehicles. **Annals Of "Dunarea De Jos" University of Galati**, Galati, 35, 2024., p. 36-44

BHUVANESH KUMAR, M.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, n. 159, 2021., p. 107228

BITFAB. Guia visual para resolver problemas impressão 3D pela Bitfab. **Bitfab**, 2022. Disponivel em: https://bitfab.io/pt-pt/blog/problemas-impressao-3d/#_El_pie_de_elefante. Acesso em: 18 nov. 2024.

BOSCHETTO, A.; BOTTINI, L. Accuracy prediction in fused deposition modeling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2016., p. 1385-1394

BRENNEN, E. A hydrodynamics of pumps. **Cambridge University Press**, 1982.

BUILDTAK. What is bed adhesion? **BuildTak**, 2023. Disponivel em: https://all3dp.com/2/3d-printer-bed-adhesion-all-you-need-to-know/. Acesso em: 02 dez. 2024.

CASTRO, F. Sistemas de Armas. **Rafael Advanced Defense Systems**, 2009. Disponivel em: http://sistemasdearmas.com.br/nav/modmbums.html. Acesso em: 16 jun. 2024.

CHACÓN, M. *et al.* Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **In: _____ Materials & Design**. 124. ed. [S.l.]: [s.n.], 2017., p. 143–157. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065.

CHIKHOUNE, A.; *et al*. Influence of infill pattern and layer height on additively manufactured 17-4 PH/PLA composite. **E3S Web of Conferences**, 564, 2024., p. 01002

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. **World Scientific Publishing Company**, 2010.

COHERENT MARKET INSIGHTS. Mercado de veículos terrestres não tripulados - Preço, Tamanho, Compartilhar e Crescimento. **coherentmarketinsights.com**, 2021.

COSTA, E.; MARCONDES. www.defesanet.com.br. **Defesa Net**, 2025. Disponivel em: https://www.defesanet.com.br/naval/marinha-investe-em-tecnologia-de-sistemas-nao-tripulados-para-fortalecer-a-defesa-naval-e-a-seguranca-maritima/. Acesso em: 22 mar. 2025.

CREAFORM. MaxSHOT 3D. **CREAFORM**, 2024. Disponivel em: https://www.creaform3d.com/en/products/optical-measuring-systems-maxshot-3d. Acesso em: 06 jan. 2025.

DING, S.; *et al*. A novel method for reducing warping deformation in FDM 3D printing. **Journal of Manufacturing Processes**, 37, 2019., p. 155-163

DROZDA, F. O.; PEREIRA, T. R.; PATTERSON, A. E. End-User Manufacturing with FDM/FFF: Interfaces, Tolerances, Repeatability, and Dimensional Accuracy. **IISE Annual Conference and Exhibition**, New Orleans, 2020.

DUARTE, C. T. **Efeito do Evelhecimento em Ambiente Marinho nas Propriedades Mecânicas de Peças Multimaterial Fabricadas pela Manufatura Aditiva**. Rio de Janeiro. 2024.

DUNBABIN, M.; MARQUE, L. Robotics for Environmental Monitoring. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, 19, n.1, 2012., p. 20-23 IEEE.

FELLI, M.; FALCHI, M.; GUJ, G. Experimental Analysis of Propeller Wake Evolution and Instability Mechanisms. **Ocean Engineering**, 38(6), 2011., p. 1044-1054

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: A review." *Journal of Materials Engineering and Performance, 6, 2014., p. 1917-1928

FREEPIK. **Freepik - Orange hexacopter drone with camera**, 2024. Disponivel em: https://www.freepik.com/premium-psd/orange-hexacopter-drone-with-camera_418240581.htm. Acesso em: 2025.

GAFUROV, S. A.; KLOCHKOV, E. V. Autonomous Unmanned Undewater Vehicles development tendencies. **Elsevier Ltd**, 2015.

GAO, Y. *et al.* Design and fabrication of high-performance 3D printed propellers for autonomous underwater vehicles. **Materials & Design**, 2020.

GEBHARDT, A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. **Hanser Publications**, n. 2nd ed., 2019.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. **Additive Manufacturing Technologies**, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, W.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. **Springer**, 2015.

GORNI, R. Prototipagem rápida: uma nova ferramenta para o desenvolvimento de

produtos, 2001.

GRGIć, I.; *et al.* Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields. **Processes 2023**, 2023.

GROOVER, M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. **Pearson**, 2020.

GROTKOWSKY, M. A. Sistemas de controle distribuídos: desenvolvimento de uma aplicação para veículos submarinos não tripulados. **Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2012. Disponivel em: www.teses.usp.br.

GUPTE, S.; MOHANDAS, P. I.; CONRAD, J. M. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. **Proceedings of the 2012 IEEE Southeastcon**, 2012., p. 1-6

HITOP INDUSTRIAL. O que é máquina CMM? **HiTop Industrial**, 2025. Disponivel em: https://hitopindustrial.com/pt/o-que-e-maquina-cmm/. Acesso em: 06 jan. 2025.

HOERNER, S. F. Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance. **Hoerner Fluid Dynamics**, 1965.

HOSSAIN, S.; RAMOS, A.; ESPINOSA, D. Experimental characterization and multi-scale modeling of ABS used in FDM additive manufacturing. **Polymer Testing**, n. 43, 2014., p. 1-9

INSPESOLDA. Inspeção Dimensional: Garantindo Precisão e Qualidade em Componentes, 2019.

JAIN, A. *et al.* Design and Development of Underwater Vehicle: ANAHITA, 2021.

JONES, T.; WANG, Y. A review of sensor-based navigation systems for autonomous vehicles. **Journal of Autonomous Systems and Applications**, 3, 2021., p. 234–256

KACMARCIK, J.; *et al.* An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 393, 10 ago. 2018., p. 012085

KIM, J.; PARK, S.; LEE, H. Magnetic Sealing Mechanisms for Autonomous Underwater Vehicles. **Journal of Marine Science and Engineering**, 2018., p. 54-65

KONGSBERG. DVL Technology for Underwater Navigation. **Kongsberg Maritime Technical Report**, 2020.

LEE, A. Y.; AN, J.; CHUA, K. Fundamentals and applications of 4D printing in advanced manufacturing. **Materials Today**, 2019., p. 103-121

LEE, J. Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied materials today**, 2017., p. 120-133

LIGON, S. C.; *et al*. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. **Chemical Reviews**, 2017., p. 10212–10290

LINK, W. DVL Specifications and Operational Guidelines. **Water Link**, 2023. Disponivel em: https://waterlinked.com/.

LIU, J.; *et al*. The influence of infill density on the mechanical properties of PLA samples in FDM 3D printing. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 3019, 2025., p. 012046

LOONEY, M. The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment. **Analog Dialogue**, June 2015., p. 49-06

LOPES, S. https://www.flickr.com/photos/portalfab/. **Força Aérea Brasileira (FAB) - Brazilian Air Force**, 2017. Disponivel em: https://www.flickr.com/photos/portalfab/albums/72157713373851697/page4. Acesso em: 14 out. 2024.

MAGMA. 3 Soluções para “over extrusion” extrusão excessiva em impressão 3D. **Magma**, 2019. Disponivel em: https://magma3d.com.br/2020/04/07/over-extrusion-extrusao-excessiva/. Acesso em: 14 nov. 2024.

MAGMA3D. Magma 3D. **Magma 3D**, 2019. Disponivel em: https://magma3d.com.br/2020/04/07/over-extrusion-extrusao-excessiva/. Acesso em: 10 nov. 2024.

MAHADEVAN, P. The Military Utility of Drones. **CSS Analyses in Security Policy V.78**, ETH Zurich, 2010.

MARCHAJ, A. Aero-hydrodynamics of sailing. **International Marine/Ragged Mountain Press**, 2000.

MELO, J. M. T. M. 3D printer nozzle: effects of die dimension, geometry, and material on the quality of FFF printed parts in PLA, Porto, 2022., p. 64-66

MENDONÇA, E. C.; *et al.* Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva. **Revista Pesquisa Naval**, 2020., p. 10-16

MOHSAN, S. A. H. *et al.* Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A, 2022.

MURALIDHARAN, N.; *et al*. Structural analysis of mini drone developed using 3D printing technique. **Materials Today: Proceedings**, n. 46, 2021., p. 8748–8752

NBR ISO 2768-1. **Tolerâncias gerais Parte 1:** Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual. Rio de Janeiro: [s.n.], 2001.

NEWMAN, N. Marine Hydrodynamics. **MIT Press**, 1977.

NGO, T. D. . E. A. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, 2018., p. 172-196

NORTEK. DVL 500: Specifications and Applications. **Nortek Group**, 2022. Disponivel em: https://www.nortekgroup.com/products/dvl500-6000-m.

NUÑEZ, P. J.; *et al*. Dimensional and surface texture characterization in fused deposition

modelling (FDM) with ABS plus. **Procedia Eng.**, 132, 2015., p. 856-863 Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.570.

O'CONNELL, ; KONDO,. 3D Print Ghosting & Ringing: 3 Easy Fixes. **ALL3DP**, 2022. Disponivel em: https://all3dp.com/2/3d-printer-ringing-3d-print-ghosting/. Acesso em: 02 dez. 2024.

OLIVEIRA, L. M. Desenvolvimento de veículos autônomos submarinos para aplicações oceanográficas. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2017. Disponivel em: www.teses.usp.br.

PATEL, R.; SINGH, K.; THOMPSON, J. Advancements in additive manufacturing for autonomous vehicle components: A focus on lightweight and complex structures. **International Journal of Manufacturing Science**, 4, 2020., p. 567–589

PAULL, L.; SETO, M.; LI, H. Navigation for Autonomous Underwater Vehicles: Challenges and Trends. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 1, 2014., p. 121-132

POMBINHA, P.; *et al*. **A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in FDM**. 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018). Singapore: [s.n.]. 2018, p. 14–17.

PORTELA , S. **3DLAB**, 2020. Disponivel em: https://3dlab.com.br/sub-extrusao-o-que-e/?srsltid=AfmBOoq6Inqc8NPFQycX9anI03_nEDhjVQNjxjUv35ldjQd4ZsN0GBhJ. Acesso em: 10 nov. 2024.

RADHARAMANAN, R.; *et al*. Use of 3D Printers to Design, Build, Test and Fly a Quadcopter Drone. **The Journal of Management and Engineering Integration**, 9, n. 1, 2016.

RAJ, P.; BANDYOPADHYAY, A. Ferrofluid-Based Sealing Systems for Deep-Sea Applications. **Applied Physics Letters**, 2019.

RANE, K.; RUDRAPATNA, A. Fused Deposition Modeling Process Parameter Optimization and Effect on Mechanical Properties and Surface Quality of ABS Parts. **Materials Today: Proceedings**, 19, 2019., p. 1329-1334

RODRIGUES, R. Inspeção dimensional com CMM. **UTFPR**, 2018. Disponivel em: repositorio.utfpr.edu.br.

SANTOS, L.; *et al*. Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por FDM: Uma abordagem conceitual, s.n., n. S.1., 2021.

SBG Systems. **SBG Systems**, 2025. Disponivel em: https://support.sbg-systems.com/sc/kb/latest/inertial-sensors-installation/dvl-installation. Acesso em: 2025.

SCHAECHTL, P.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S. Statistical Tolerance Analysis of 3D-Printed Non-Assembly Mechanisms in Motion Using Empirical Predictive Models.

Applied Sciences, 11, n. 4, 20 fev. 2021., p. 1860

SEDLAK, J.; ZEMICIK, O. Application of Linear Optimization on Parameters of 3D FDM Print. **Tehnicki vjesnik - Technical Gazette**, 26, n. 4, jul. 2019.

SHIN, ; KIM, D. Development of Magnetically Reinforced Elastomers for Waterproof Sealing. **Materials Science and Engineering A**, 2020., p. 789

SILVA, C. T. Veículos não tripulados – Terrestres e Aéreos. **embarcados.com.br**, 2021.

SON, J.; NO, C. Hydrodynamic design of AUVs based on NACA profiles. **Journal of Marine Science and Technology**, n. 23(4), 2018., p. 579-590

SONARDYNE. Sonardyne. **www.sonardyne.com**, 2020. Disponivel em: https://www.sonardyne.com/. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Mater. Des.**, 31, n. 1, 2010., p. 287-295 Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016.

SOUZA, E. C. Modelagem e controle de veículos submarinos não tripulados. **Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2003. Disponivel em: www.teses.usp.br.

STRIPES, S. A. www.defesaaereanaval.com.br/. **Defesa Aérea e Naval**, 2021. Disponivel em: https://www.defesaaereanaval.com.br/internacional/russia-aperfeicoa-seus-veiculos-terrestres-nao-tripulados-no-exercicio-zapad.

SYRLYBAYEV, D.; *et al.* Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review Polymers, 13, 2021., p. 1587

TECH CD. **Tech CD**, 2021. Disponivel em: https://techcd.com.br/noticias/evitar-warping/. Acesso em: 16 out. 2024.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. Probabilistic robotics. **MIT press**, 2006.

TORRES, J. *et al.* An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. **Rapid Prototyping Journal**, (2), 2015., p. 1–10 Disponivel em: https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, 2014., p. 192-204

TYMRAK, M.; KREIGER, M.; PEARCE, M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials & Design**, 58, 2014., p. 242-246

WANG, L.; *et al*. A study on the effect of printing parameters on mechanical properties of FDM parts. **Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 14, p. 55-63,

2021.

WANG, L.; GARDNER, D. J.; BOUSFIELD, D. W. Cellulose nanofibril-reinforced polypropylene for material extrusion additive manufacturing. **Polymer Engineering & Science**, 5, 2017., p. 793-801

WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. **Remote Sensing**, 6, 2012., p. 1671-1692

WEBB, J. FacFox. **FacFox**, 2020. Disponivel em: http://pt.insta3dm.com/info/5-tips-to-avoid-layer-delamination-in-3d-print-47629873.html.

WERTZ, J. R. Space Mission Analysis and Design. **Springer**, 2019.

ZEMICIK, O.; SEDLAK, J. Application of Linear Optimization on Parameters of 3D FDM Print. **Tehnicki vjesnik - Technical Gazette**, 26, n. 4, jul. 2019.

ZHENG, Y.; *et al*. Scientometric Analysis and Systematic Review of Multi-Material Additive Manufacturing of Polymers. **Polymers**, n. 13(12), 2021., p. 1957

ZHOU , H.; *et al.* The effect of nozzle temperature and build orientation on surface roughness of FDM printed parts. **Additive Manufacturing**, v. 62, p. 103-281, 2023.

ZONA Spasial. **Zona Spasial - Spatial Data Processing**, 2019. Disponivel em: https://zonaspasial.com/artikel-geospasial/teknologi/prinsip-cara-kerja-sebuah-uav/. Acesso em: 06 abr. 2024.

ŽUKAUSKAS, A.; LYRINTZIS, S.; PAPADAKIS, M. Analysis of Hydrodynamic Forces Acting on Underwater Vehicles. **Journal of Fluid Mechanics**, 2018., p. 220-246

ANEXO I

Artigos Publicados.

Avaliação Dimensional de Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva para Aplicação em Veículos Autônomos

Filipe Pereira Berardi[1,2], Pedro Humberto de Accioly Costa [2], Vilson Berilli Mendes[1], Doina Mariana Banea [2]
[1]Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), Rio de Janeiro /RJ – Brasil
[2] Centro Federal de Educação Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET), Rio de Janeiro /RJ – Brasil

***Resumo* – O uso de drones em aplicações civis e militares tem crescido devido à redução de custo dos veículos. Em geral, drones precisam ser produzidos com estruturas leves e com alta precisão dimensional, permitindo uma maior autonomia e melhor orientação espacial, respectivamente. A Manufatura Aditiva tem sido cada vez mais explorada para a fabricação de drones por permitir a fabricação de peças leves, devido ao processo de fabricação que pode definir diferentes percentuais de preenchimento interno, controlando assim sua densidade. Entretanto, ainda há pouco estudo sobre o efeito dos parâmetros de padrão e percentual de preenchimento na tolerância dimensional dos componentes. Este estudo visa avaliar, de acordo com a norma DIN 7168, o impacto do padrão e percentual de preenchimento na tolerância dimensional de peças fabricadas por Impressão 3D utilizando máquina de baixo custo e os filamentos PLA e ABS, mais populares no mercado.**

***Palavras-Chave* – Manufatura Aditiva, Drone, Avaliação Dimensional.**

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, os veículos autônomos têm se tornado capazes de desempenhar atividades cada vez mais diversas, reduzindo a exposição da vida humana às situações de risco e permitindo ampliar o conhecimento acerca do ambiente marinho [1].

Veículos Autônomos têm uma ampla gama de aplicações em diversas áreas como Inspeção de Infraestruturas, Resgate e Operações de Emergência, Logística e Entregas, Pesquisa Científica, Aplicações Militares e outras. Em aplicações militares, o uso de Veículos Autônomos logra contribuir como uma forte vantagem tática, uma vez que podem representar uma extensão de embarcações de guerra e de veículos terrestres, por meio da utilização dos Veículos Autônomos Submarinos (VSA) e/ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT/Drones) [2].

Os drones assumiram um papel de liderança no contraterrorismo e na contra insurgência e são projetados para ter uma importância crescente em futuras operações militares. Seu baixo custo os tornam descartáveis, o que é ideal para missões altamente perigosas ou politicamente sensíveis. No entanto, limitações técnicas, bem como prováveis melhorias em tecnologias concorrentes, nomeadamente sistemas de defesa aérea, devem circunscrever o papel militar dos drones [3].

Com base no estudo de [4], pode-se observar que a impressão 3D é amplamente utilizada em diversas áreas. Dentre as principais aplicações da impressão 3D, destaca-se a impressão de peças funcionais, que já corresponde a cerca de 29% de todo o uso dessa tecnologia. Em muitos casos, também é possível se obter produtos impressos por MA com acabamento e estruturas confiáveis, de modo que possam ser utilizados como produto final [5]. Essas informações indicam que a impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia cada vez mais relevante e com potencial para revolucionar a produção de produtos finais.

Como exemplo de MA em aplicações com Drones, é possível observar nos trabalhos apresentados por [6] e [7] que, de um modo geral, os propósitos em utilizar a tecnologia MA na produção de Drones visam redução de peso e otimização topológica da estrutura mecânica com objetivo de ampliar o alcance, reduzir o custo de produção dos protótipos e aumentar a velocidade de fabricação. Entretanto, segundo [7], algumas das dificuldades encontradas para projetar, construir, testar e pilotar um drone, utilizando impressoras 3D, incluem erros de montagem, problemas de dimensionamento e incompatibilidade de software.

A estimativa inicial do desvio de rota dos veículos autônomos deve incluir contribuições de erro tanto da *Inertial Measurement Units* (IMU) quanto do sistema mecânico que a mantém no posicionamento requisitado durante a operação. Compreender o impacto que estes erros têm nas principais funções de um sistema de navegação ajuda a estabelecer metas de desempenho relevantes que evitam sobrecarregar o problema, ao mesmo tempo que gere o risco de perder desempenho chave e compromissos de custos [8].

De acordo com [9], mecanismos mostrados em uma análise estatística de tolerância, o real estado da arte relacionado especificamente a impressão 3D carece de métodos adequados para resolver problemas derivados dos mecanismos das impressoras. Complementarmente, [10] sublinham a complexidade do processo de impressão, enfatizando a extensa gama de parâmetros e limites. Em seu trabalho, [9] destacou artigos cujo foco trata sobre precisão, tolerâncias, parâmetros de processo, etc. Em [11], por exemplo, é proposto que para a tecnologia FDM, é essencial uma análise completa e sistemática da precisão, da tolerância e da repetibilidade. Adicionalmente, [12] destacou imperfeições como folgas nas juntas e desvios geométricos que dependem de parâmetros de processos específicos da máquina. Entretanto, Kacmarcik et al. [13] demonstram que uma peça de referência relativamente simples pode ser uma boa opção para avaliar eficazmente a precisão de várias características geométricas e revelar diferenças entre duas impressoras 3D de mesa em termos de precisão.

Em [14] é apresentado uma investigação referente a influência da espessura da camada e da densidade de preenchimento na tolerância geométrica de peças produzidas por FDM, entretanto, o estudo de [14] foi realizado apenas para o material Nylon e utilizou uma máquina que possui um custo mais elevado do que a utilizada neste trabalho. Neste sentido, este artigo visa contribuir na avaliação da regularidade da precisão dimensional de peças empregadas como elementos finais em montagens de estruturas mecânicas, produzidas por impressora 3D e cujas dimensões estejam de acordo com a tabela de tolerância Norma DIN 7168 Grau Médio [15], ratificando a possibilidade de se utilizar máquinas de baixo custo e materiais mais usuais na produção de veículos autônomos em série.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxo do processo de impressão 3D ocorre a partir da criação de um modelo tridimensional através de um *software* CAD (Computer-Aided-Design) [16]. Este modelo é convertido para um arquivo em formato de estereolitografia (STL), que simplifica o modelo original para um conjunto de elementos triangulares. Este arquivo é então dividido horizontalmente (ou fatiado) por meio de um *software* de fatiamento, em diversas camadas, Fig. 1b, representando os contornos bidimensionais, que quando depositadas umas sobre as outras através do processo denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM) formam o modelo tridimensional original [17].

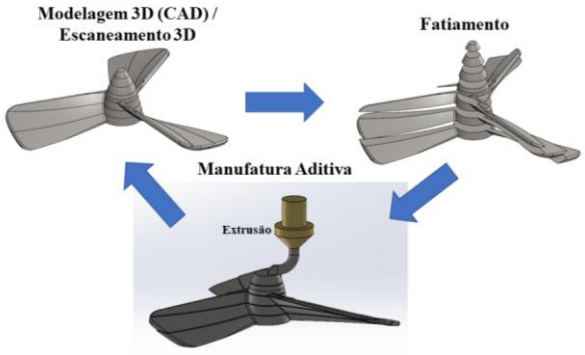


Fig. 1. Conceito básico do processo de MA.

Antes de apresentar a metodologia empregada para este estudo é relevante relatar informações sobre a instrumentação utilizada, algumas definições referentes aos parâmetros para geração de corpos de provas e o procedimento de inspeção dimensional adotado.

A. Instrumentação

Neste artigo, tomou-se como base a instrumentação empregada por [9]. Ou seja, analogamente, foi utilizada a impressora 3D CREALITY ENDER-3 PRO, cuja precisão é de ±0,1 mm. No caso do software de fatiamento CURA, para este trabalho, foi utilizada a versão 5.7.1. O material de extrusão utilizado por [9] foi o filamento de PLA (grau A - 100% original, e material inócuo, branco, 1,75 mm), neste trabalho foi acrescentada uma investigação também para o filamento ABS (grau A - 100% original, e material inócuo, branco, 1,75 mm), ambos conforme especificações do fabricante 3D LAB. A pesquisa com base nesses materiais é interessante por serem facilmente encontrados no mercado, de custo acessível, com observância em diversas aplicações.

Os corpos de prova foram desenvolvidos e fabricados no Laboratório de Prototipagem (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha. Em relação a inspeção dimensional, foi realizada no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha. Todas as medições foram obtidas por meio de uma máquina tridimensional modelo B-251 Mitutoyo, com última calibração feita em 22/09/2022, contendo o software MCOSMOS-Manual v3.0 R3 Edition 17.

B. Designação do Corpo de Prova (CP)

Nesta seção são apresentados o detalhamento e as considerações tomadas como critério de decisão para determinar os parâmetros considerados na definição do modelo do CP.

1) Melhorias de Impressão: Conforme orienta [9], realizou-se a calibração do fluxo de material da extrusora, com a adequação da relação passos/mm e nivelamento da mesa.

2) Modelo CAD e conversão do arquivo em STL: Com base no modelo de CP utilizado por [9], adotou-se para a implementação tridimensional do CP no programa *Solidworks* 2022, um toro com a dimensão do diâmetro interno de 35 mm, diâmetro externo de 50 mm e altura de 10 mm, conforme Fig. 2.

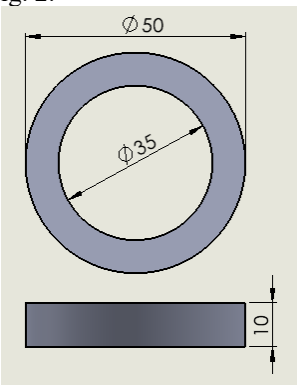


Fig 2: Modelo tridimensional do CP. Fonte: Autor.

De acordo com a referência [9], percebe-se que existe influência do refinamento da malha triangular do arquivo STL nas dimensões de objetos circulares. Portanto, para a conversão do arquivo CAD para STL, a configuração do programa *Solidworks* foi personalizada para a resolução máxima, com os valores de tolerância de 0,0035mm para o parâmetro “Desvio” e de 0,5º para o ângulo, Fig. 3.

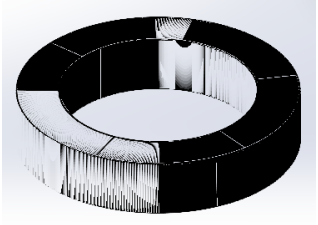


Fig 3: Modelo do CP em STL com alta resolução. Fonte: Autor.

3) Processo de Fatiamento: Partindo dos parâmetros padrão do programa CURA, foi realizado uma análise preliminar dos parâmetros de fatiamento a serem adotados na fabricação do CP, implementando as alterações propostas por [9]. Os parâmetros do CP 01 estão representados na Tabela 1.

TABELA I: PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CP 01

	PLA
Temperatura de extrusão (°C)	200
Temperatura de mesa (°C)	60
Preenchimento Interno (%)	100
Tipo de Preenchimento	Linha
Orientação do Preenchimento	45°
Avanço Linear	0
Expansão Horizontal Inicial (mm)	0
Dimensão de Furo (mm)	0
Temperatura ambiente (°C)	27
Umidade (%)	44
Início da Camada	Posterior

Em seguida, foi produzido o CP 02, alterando o parâmetro de Avanço Linear para 25 e o CP 03, com Avanço Linear de 25, Expansão Horizontal Inicial de -0,2mm e Dimensão de Furo de 0,13mm, que foram os recursos utilizados por [9]. Ao comparar as dimensões em duas alturas diferentes destes corpos de prova, foi possível concluir que os parâmetros utilizados por [9] realmente foram os que produziram os CPs com dimensões mais próximas das do modelo CAD. Com isso, foi determinado os parâmetros para a produção dos CPs subsequentes, Tabela 2.

TABELA II: PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CPs

	PLA	ABS
Temperatura de extrusão (°C)	200	230
Temperatura de mesa (°C)	60	100
Altura entre o bico e mesa (mm)	0,2	0,2
Diâmetro do Filamento (mm)	1,75	1,75
Preenchimento Interno (%)	20 e 100	20 e 100
Tipo de Preenchimento	Linha, Grade e Giróide	Giróide
Orientação do Preenchimento	45°	45°
Velocidade de impressão (mm/s)	50	50
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,4	0,4
Avanço Linear	25	25
Expansão Horizontal Inicial (mm)	-0,2	-0,2
Dimensão de Furo (mm)	0,13	0,13
Temp. ambiente (°C)	23 a 28	23 a 28
Umidade (%)	entre 44 a 65	entre 50 a 65
Início da Camada	Posterior	Posterior

Em relação ao percentual de preenchimento interno, para este artigo, optou-se por avaliar a configuração desse parâmetro em 100% e 20%, correspondente ao valor máximo e o valor padrão do programa CURA, permitindo a avaliação de 2 casos extremos. Quanto ao padrão de preenchimento, foram selecionados arbitrariamente os tipos linha, grade e giróide.

4) Impressão 3D: A fabricação dos CPs ocorreu na impressora 3D Ender 3 Pro, utilizando os filamentos PLA e ABS da marca 3D Lab, em sala com ambiente monitorado, com temperatura entre 23 e 28ºC e umidade entre 44 a 64%. Além disso, para facilitar a adesão do CP à mesa durante a extrusão, foi utilizada cola bastão da marca Scotch, composta por Polivinil.

C. Inspeção Dimensional

O levantamento dimensional das peças ocorreu no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha, em ambiente monitorado com temperatura de 22°C e umidade entre 45 a 60%. O procedimento de medição para cada dimensão, diâmetro interno e externo, foi realizado pelo contato da ferramenta em quatro pontos equidistantes, em duas alturas distintas do CP. A medição de cada dimensão em duas alturas se faz necessária devido a possível presença do erro de impressão denominado de "pata de elefante", correspondente a uma variação dimensional que pode ocorrer na base das peças, repercutindo em um aumento de dimensão para medidas externas de eixos e diminuição para medidas internas de furos. Esta discrepância pode ocorrer em função da distância ajustada entre o bico extrusor e a mesa de impressão, que leva a compressão do material depositado nas primeiras camadas, fazendo com que o material extravase lateralmente [9], conforme pode ser observado na Fig. 4.

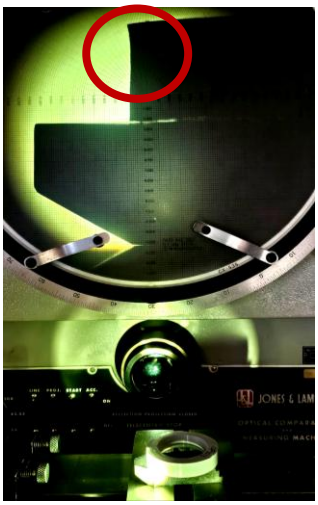


Fig 4: Modelo impresso em projetor de perfil apresentando anomalia "Pata de Elefante". Fonte: Autor

Desta forma, definiu-se duas alturas para serem avaliadas nos CPs, a primeira com uma altura H1 = 1 mm, próximo as primeiras camadas para avaliar o efeito da "pata de elefante", e a segunda H2 = 8 mm, distante o suficiente da base para garantir que a "pata de elefante" não afete significativamente a dimensão nominal dos CPs. Ambas medidas referenciadas à base da mesa de impressão.

D. Metodologia da Investigação

Para este estudo, adotou-se como procedimento de investigação a medição das dimensões de três corpos de prova para cada conjuntura de tipo (Linha, Grade e Giróide) e percentual (20 e 100%) de preenchimento. Para cada CP foi calculada a média e o desvio padrão das dimensões dos diâmetros internos e externos, nas alturas H1 e H2.

O esquema dos CPs produzidos pode ser observado no fluxograma apresentado na Fig. 5.

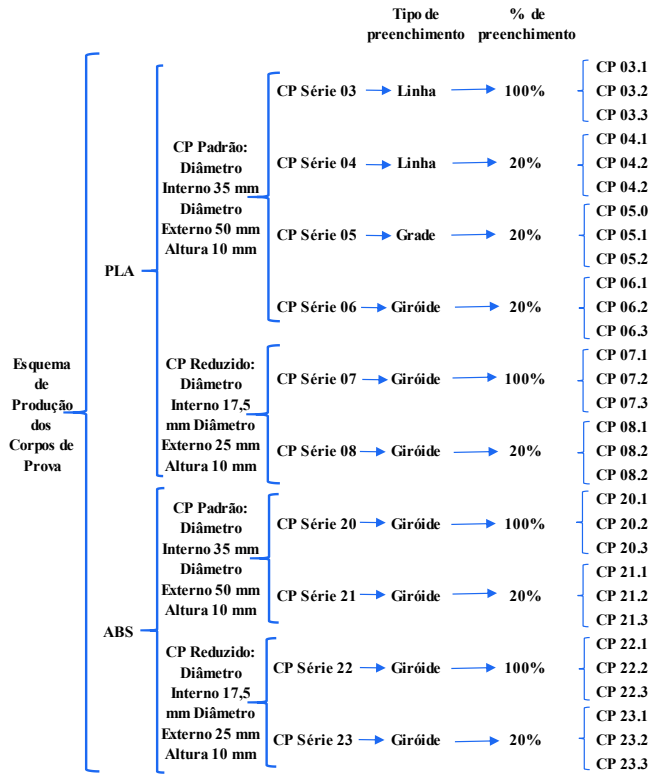


Fig 5: Fluxograma dos Corpos de Prova (CP). Fonte: Autor.

Adicionalmente, foi feita uma nova avaliação alterando os diâmetros externo e interno, reduzindo os valores para a metade do valor inicial do CP 03, Fig. 5.

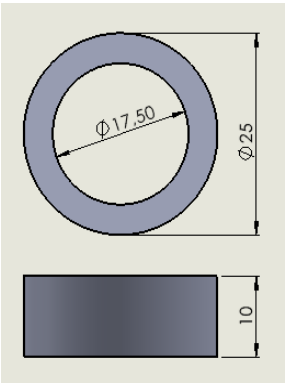


Fig 6: Modelo do CP reduzido. Fonte: Autor.

Desta forma, com CPs Reduzidos, as dimensões do diâmetro externo e interno se enquadram em outra faixa de Tolerância Dimensional da Norma DIN7168 - Grau Médio, conforme pode ser observado na Fig. 6, possibilitando verificar se o comportamento das tolerâncias se mantém ou não com relação a ordem de grandeza das dimensões.

TOLERÂNCIA LONGITUDINAL DIN 7168								
DIMENSÃO	> 0,5	> 3	> 6	> 30	> 120	> 315	> 1000	> 2000
GRÁU	≤ 3	≤ 6	≤ 30	≤ 120	≤ 315	≤ 1000	≤ 2000	≤ 4000
MÉDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Fig 7: Norma DIN7168 - Grau Médio

Para os CPs com diâmetros menores optou-se por avaliar apenas os produzidos no percentual de 20% no padrão Giróide, pois este foi o padrão que apresentou a maior discrepância em relação à dimensão nominal do modelo CAD na investigação inicial, e também com percentual de 100% de preenchimento.

III. RESULTADOS

Todos os corpos de provas tiveram os diâmetros internos e externos medidos nas alturas definidas (H1 e H2), e posteriormente realizada a média e desvio padrão de cada série. Para ilustrar o procedimento de investigação dos dados coletados, é possível observar os valores obtidos para as medições de H2 da série CP03, apresentados na Tabela III.

TABELA III: RESULTADOS DA SÉRIE CP 03

Codificação	H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 03.1	35,079	49,785	100	Linha
CP 03.2	35,031	49,878	100	Linha
CP 03.3	35,014	49,839	100	Linha
Média CP 03.1, 03.2, 03.3	35,041	49,834	100	Linha
Desvio Padrão	0,040	0,039		

Na Tabela IV, pode-se observar os valores das médias da série dos CP's maciços (preenchimento 100%) e as séries dos CP's com 20% de preenchimento e com os padrões: Linha, Grade e Giróide.

TABELA IV: MÉDIAS E DESVIO PADRÃO - SÉRIES 03, 04, 05 e 06

Codificação	H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
Média CP 03.1, 03.2, 03.3	35,085	49,896	100	Linha
Desvio Padrão	0,040	0,039		
Média CP 04.1, 04.2, 04.3	35,107	49,861	20	Linha
Desvio Padrão	0,023	0,007		
Média CP 05.1, 05.2, 05.3	35,124	49,871	20	Grade
Desvio Padrão	0,031	0,020		
Média CP 06.1, 06.2, 06.3	35,155	49,884	20	Giróide
Desvio Padrão	0,041	0,013		

Na Tabela III, é possível observar que a média da série CP 06, com tipo de preenchimento Giróide, apresenta o valor mais distante da média da série CP 03 para diâmetro interno, sendo a diferença de 0,07 mm e de 0,155 mm para o valor nominal de 35 mm, entretanto, ambos também enquadrados na tolerância DIN 7168 - Grau Médio. Ademais, é interessante observar que, no caso do diâmetro externo, a diferença é ainda menor. Vale destacar também que a maior diferença entre a medida das séries dos CP's é de 0,035 mm e a diferença para o valor nominal de 50 mm é de 0,139 mm. Outra informação importante a ser destacada é que a série de CP's com preenchimento total apresentam o diâmetro externo maior e o diâmetro interno menor em

relação as demais séries, provavelmente por excesso de material depositado.

Nos gráficos I, II, III e IV (Fig. 8 e Fig. 9), apresenta-se os valores das médias dos diâmetros dos CP's da investigação inicial, com tamanho padrão, e dos CP's menores com redução de 50% nos diâmetros. Desta forma, é possível avaliar a relação da tolerância em outra faixa de ordem de grandeza.

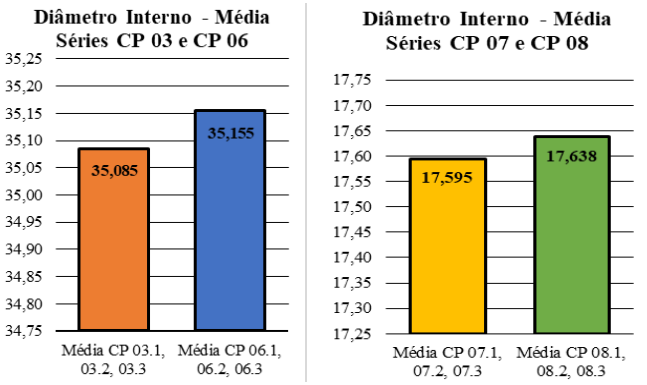


Fig 8: Gráficos I e II: Dados de Diâmetros Internos

Observa-se nos gráficos I e III que as séries de tamanho padrão (CP03 e CP06) apresentam variação de 0,07 mm e 0,012 mm para os diâmetros internos e externos respectivamente, enquanto as séries dos CP's reduzidos, gráficos II e IV, apresentam variação de 0,043 mm e 0,058 mm. Com isso, não é possível observar uma relação direta entre a tolerância e a ordem de grandeza das medidas, mas sim o mesmo comportamento na variação do diâmetro externo maior e diâmetro interno menor, no caso dos CP's maciços em relação aos demais CP's.

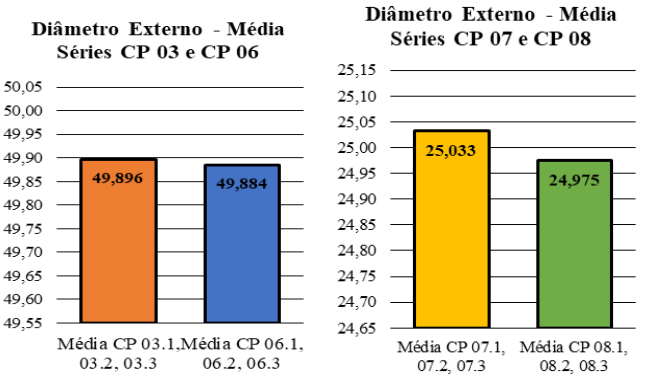


Fig 9: Gráficos III e IV: Dados de Diâmetros Externos

O mesmo estudo foi feito para o material ABS e apresentado nos gráficos V, VI, VII e VIII (Fig. 10 e Fig. 11), sendo possível observar um comportamento similar ao PLA. Porém destaca-se que todas as médias das séries do material ABS são menores que as médias de suas respectivas séries no material PLA.

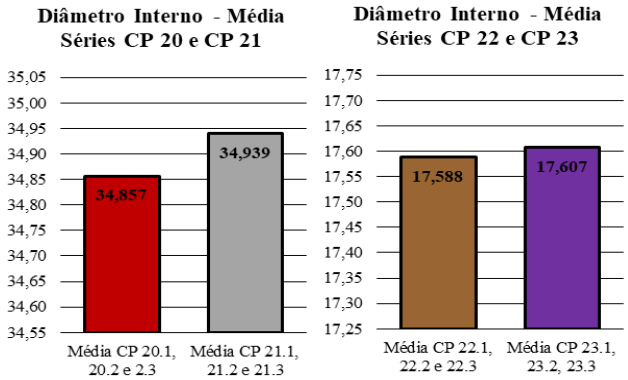


Fig 10: Gráficos V e VI: Dados de Diâmetros Internos

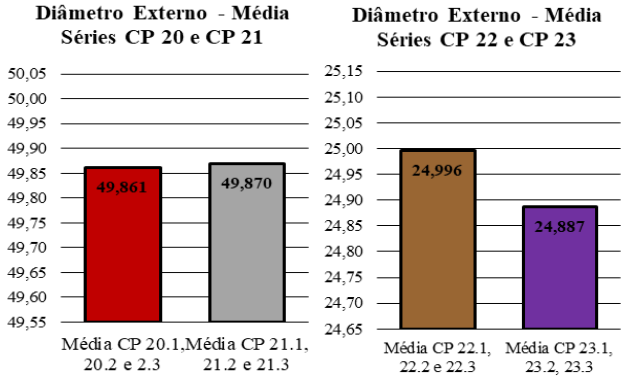


Fig 11: Gráficos VII e VIII: Dados de Diâmetros Externos

De um modo geral, apesar de todos os resultados estarem dentro da tolerância recomendada pela Norma DIN7168 GRAU MÉDIO observa-se que o desvio padrão dos CP's é de no máximo 0,075mm.

IV. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados neste artigo, conclui-se que existe possibilidade de produzir peças empregadas como produto final, em série, fabricadas por Impressão 3D utilizando máquina de baixo custo e materiais de fácil obtenção, cujas dimensões estejam de acordo com a tabela de tolerância Norma DIN 7168 Grau Médio [15]. Portanto, a utilização dessas peças em estruturas mecânicas de veículos autônomos pode ser de grande valia em situações politicamente sensíveis.

Adicionalmente, os resultados apresentados ratificam o que relata o autor da referência [17], ou seja, que o material ABS tem uma taxa de compressão maior que o PLA, e que peças maciças impressas tendem a expandir aumentando o diâmetro externo e diminuindo o interno.

Apesar das medidas encontradas respeitarem a Norma DIN 7168 - Grau Médio, ainda é possível obter valores mais próximos aos valores nominais das dimensões compensando, por exemplo, os erros sistemáticos durante a modelagem tridimensional dos CP's. Desta forma, visando atender a norma DIN 7168 - Grau Fino [15], é válido ampliar a pesquisa avaliando outros materiais e outros parâmetros de impressão. Também é interessante acrescentar aos estudos posteriores avaliações dimensionais referentes a outras formas geométricas.

REFERÊNCIAS

[1] M. Dunbabin , L. Marque, "Robotics for Environmental Monitoring", [From the Guest Editors], IEEE Robotics & Automation Magazine, IEEE, v. 19, n. 1, p. 20–23, 2012.

[2] W. H. Adnan, et al., "Drone Use in Military and Civilian Application: Risk to National Security", Journal of Media and Information Warfare, v. 15(1), p. 60-70, 2022.

[3] P. Mahadevan, "The Military Utility of Drones", CSS Analyses in Security Policy V.78, Center for Security Studies (CSS), ETH Zurich, 2010.

[4] S. C. Ligon, et al., "Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing", Chemical Reviews, n. 117, p. 10212–10290, 2017.

[5] E. C. Mendonça, et al., "Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva", Revista Pesquisa Naval, n. 32, p. 10-16, 2020.

[6] N. Muralidharan, et al., "Structural analysis of mini drone developed using 3D printing technique", Materials Today: Proceedings, n. 46, p. 8748–8752, 2021.

[7] R. Radharamanan, et al., "Use of 3D Printers to Design, Build, Test and Fly a Quadcopter Drone", The Journal of Management and Engineering Integration Vol. 9, No. 1, 2016.

[8] M. Looney, "The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment", Analog Dialogue p. 49-06, June 2015.

[9] I. Grgić, et al., "Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields", Processes 2023, 11, 2810, 2023.

[10] O. Zemicik, e J. Sedlak, "Application of Linear Optimization on Parameters of 3D FDM Print", Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, v. 26, n. 4, jul. 2019.

[11] F. O. Drozda, T.R. Pereira, A. E. Patterson, "End-User Manufacturing with FDM/FFF: Interfaces, Tolerances, Repeatability, and Dimensional Accuracy", 2020 IISE Annual Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, 2020.

[12] P. Schaechtl, B. Schleich, e S. Wartzack, "Statistical Tolerance Analysis of 3D-Printed Non-Assembly Mechanisms in Motion Using Empirical Predictive Models", Applied Sciences, v. 11, n. 4, p. 1860, 20 fev. 2021.

[13] J. KACMARCIK, et al., "An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 393, p. 012085, 10 ago. 2018.

[14] P. Pombinha, et al., "A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in Fdm", 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018), Singapore, p. 14–17, May 2018.

[15] DIN 7168, "General tolerances for linear and angular dimensions and geometrical tolerances", DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1991.

[16] A. A. GORNI, “Introdução a prototipagem rápida e seus processos”, Revista Plástico Industrial, p. 230–239, 2001.

[17] S. AHN, et al, “’Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”. Rapid prototyping journal, 2002.

DIMENSIONAL EVALUATION OF ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS FOR AUTONOMOUS VEHICLES

F. P. Berardi[1,2*], P. H. A. Costa[1], V. B. Mendes[2], M. D. Banea[1,3]

[1]Federal Center of Technological Education in Rio de Janeiro, Brazil
[2] Brazilian Navy Research Institute in Rio de Janeiro /RJ – Brazil
[3]CICECO - Aveiro Institute of Materials, Department of Materials and Ceramic Engineering, University of Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal
*Corresponding author's e-mail address: mdbanea@gmail.com

ABSTRACT

The growing use of drones in civilian and military applications is motivated mainly by reduced costs. Drones, along with autonomous vehicles, require lightweight structures and high dimensional accuracy to improve autonomy and spatial orientation. Additive Manufacturing (AM) enables the production of lightweight parts by controlling internal fill percentages and optimizing the density. However, there is limited research into how the type and percentage of infill affects dimensional tolerance. This study aims to assess the impact of these factors on 3D-printed parts, using low-cost FFF 3D printers with Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) filaments. Overall, the results were satisfactory and met the required tolerances, confirming the feasibility of using parts produced by low-cost 3D printers and commonly available materials in the mass production of drones and autonomous vehicles.

KEYWORDS: drones, autonomous vehicles, additive manufacturing, dimensional tolerance; Fused Filament Fabrication (FFF).

1. INTRODUCTION

With the advance of technology, autonomous vehicles have become capable of carrying out increasingly diverse activities, reducing the exposure of human life to risky situations and allowing us to expand our knowledge of the marine environment [1].

Autonomous vehicles have a wide range of applications in diverse areas such as infrastructure inspection, rescue and emergency operations, logistics and delivery, scientific research, military applications and others. In military applications, the use of Autonomous vehicles is able to contribute as a strong tactical advantage, since they can represent an extension of warships and land vehicles, through the use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) and/or Unmanned Aerial Vehicles (UAV/Drones) [2].

Drones have taken a leading role in counter-terrorism and counter-insurgency and are projected to be of growing importance in future military operations. Their low cost makes them disposable, which is ideal for highly dangerous or politically sensitive missions. However, technical limitations, as well as likely improvements in competing technologies, notably air defence systems, should circumscribe the military role of drones [3].

Based on the study by Ligon et al. [4], it can be seen that 3D printing is widely used in various areas. Among the main applications of 3D printing is the printing of functional parts, which already accounts for around 29% of all use of this technology. In many cases, it is also possible to obtain AM printed products with reliable finishes and structures, so that they can be used as a final product [5]. Thus, 3D printing is demonstrating to be an increasingly relevant technology with the potential to revolutionize the production of end products.

As an example of AM in drone applications, it can be seen in the works presented by Muralidharan et al. [6] and Radharamanan et al., [7] that, in general, the purposes of using AM technology in drone production are weight reduction and topological optimization of the mechanical structure in order to extend the range, reduce the cost of producing prototypes and increase the speed of manufacture. However, some of the difficulties encountered in designing, building, testing and flying a drone using 3D printers include assembly errors, sizing problems and software incompatibility [7].

The initial estimate of the route deviation of autonomous vehicles must include error contributions from both the Inertial Measurement Units (IMU) and the mechanical system that maintains it in the required position during operation. Understanding the impact that these errors have on the main functions of a navigation system helps to set relevant performance targets that avoid overloading the problem while managing the risk of losing key performance and cost trade-offs [8].

Recent studies have investigated the dimensional accuracy of 3D printed parts using FFF technology. Grgić et al. [9], developed a novel method based on

© *Galati University Press, 2024*

Date of submission/acceptance: 31.05.2024/-

ISO 286 to achieve dimensional accuracy for assembly-fit parts, finding optimal parameters for horizontal expansion and linear advance. Zemicik and Sedlak [10] highlights the complexity of the printing process, emphasizing the wide range of parameters and limits. Drozda et al. [11], for example, state that for FFF technology, a complete and systematic analysis of precision, tolerance and repeatability is essential. Schaechtl et al. [12] highlighted imperfections such as joint gaps and geometric deviations that depend on machine-specific process parameters. However, it was shown that a relatively simple reference part can be a good option for effectively assessing the accuracy of various geometric features and revealing differences between two desktop 3D printers in terms of accuracy [13].

An investigation into the influence of layer thickness and filler density on the geometric tolerance of parts produced by FFF is presented in [14]. However, this study was carried out only for the Nylon material and used a machine that is more expensive than the one used in this work. Therefore, this article aims to evaluate the consistency of dimensional accuracy in parts produced by a 3D printer for use as final components in mechanical structure assemblies. The study seeks to confirm the feasibility of employing low-cost 3D printers and commonly available materials in the mass production of autonomous vehicles.

2. MATERIALS AND METHODS

The 3D printing process flows from the creation of a three-dimensional model using CAD (Computer-Aided-Design) software [16]. This model is converted into a file in stereolithography (STL) format, which simplifies the original model into a set of triangular elements. This file is then divided horizontally (or sliced) using slicing software into several layers, Fig. 1, representing the two-dimensional contours, which when deposited on top of each other using a process called FFF form the original three-dimensional model [17].

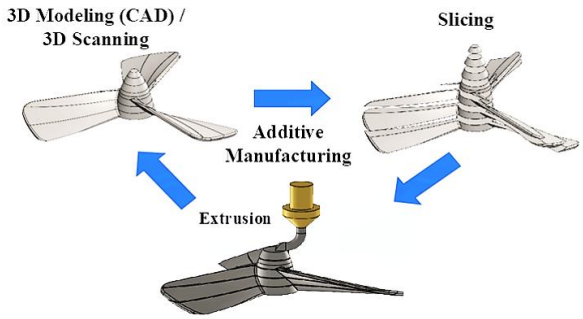


Fig. 1. Basic concept of the AM process.

Before presenting the methodology used for this study, it is important to provide information on the instrumentation used, some definitions regarding the parameters for generating specimens and the dimensional inspection procedure adopted.

2.1. Instrumentation

The same instrumentation used by Grgić et al. [9] was taken as the basis for this article. That is, the CREALITY ENDER-3 PRO 3D printer with an accuracy of ±0.1 mm, the CURA slicing software, version 5.7.1 and the PLA filament (grade A - 100% original, and innocuous material, white, 1, 75mm). In this work, an investigation for ABS filament (grade A - 100% original, and harmless material, white, 1.75 mm) was also added. It is important to highlight that both materials are in accordance with the specifications of the manufacturer 3D LAB. Research based on these materials is interesting because they are easily available on the market, affordable and can be used in a variety of applications. In addition, these materials were characterized in tensile and flexural tests, in accordance to ASTM standards, to investigate and compare the mechanical properties of the AM parts as a function of material used [18]. Other important observations have been reported about these materials, PLA has excellent mechanical properties, thermal stability, good processing capability, and low environmental impact. However, one disadvantage is that PLA is relatively expensive compared to other petroleum-based polymers [19]. ABS thermoplastic material has good mechanical properties, but it emits an unpleasant odour during processing [20]. However, novel materials for 3D printing are continuously being developed. Thus, in order to further understand the mechanical properties of these AM materials and stimulate their use in new applications in the industry, more research work is needed [18].

The specimens were designed and manufactured at the Prototyping Laboratory (LabProM) of the Brazilian Navy Research Institute. The dimensional inspection was carried out at the Metrology Laboratory of the Brazilian Navy Research Institute. All measurements were obtained using a Mitutoyo B-251 three-dimensional machine, last calibrated on 22/09/2022, containing the MCOSMOS-Manual v3.0 R3 Edition 17 software.

2.2. Designation of the specimen

This section presents the details and considerations taken as decision criteria to determine the parameters considered in the definition of the specimen model.

2.2.1. Printing improvements

As guided by Grgić et al. [9], the extruder's material flow was calibrated by adjusting the step/mm ratio and levelling the table.

2.2.2. CAD model and STL file conversion

Based on the specimen model used by Grgić et al. [9], a torus with an internal diameter of 35 mm, an

external diameter of 50 mm and a height of 10 mm was adopted for the three-dimensional implementation of the specimen in the Solidworks 2022 program, as shown in Fig. 2.

According to reference Grgić et al. [9], it can be seen that the refinement of the triangular mesh in the STL file influences the dimensions of circular objects. Therefore, to convert the CAD file to STL, the Solidworks program settings were customized for maximum resolution, with tolerance values of 0.0035mm for the "Deviation" parameter and 0.5º for the angle, Fig. 3.

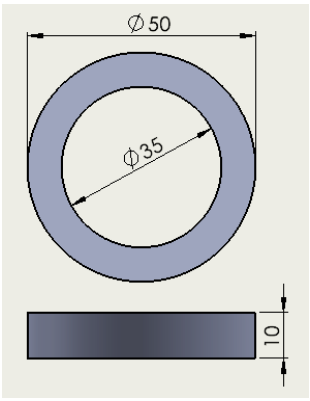


Fig. 2. Three-dimensional model of the specimen.

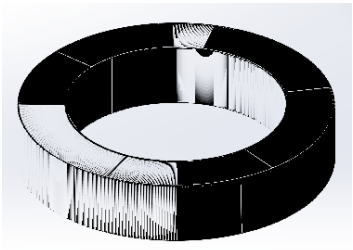


Fig. 3. High resolution STL model of the specimen.

2.2.3. Slicing process

Based on the standard parameters of the CURA program, a preliminary analysis of the slicing parameters to be adopted in the manufacture of the specimen was carried out, implementing the changes proposed by Ref [9]. The parameters for specimen 01 are shown in Table 1.

Table 1. Specimens 01 printing parameters

Priting Parameters	**PLA**
Extrusion temperature (°C)	200
Table temperature (°C)	60
Internal Filling (%)	100
Type of Filling	Line
Filling orientation	45°
Linear Advance	0
Initial Horizontal Expansion (mm)	0
Hole size (mm)	0
Ambient temperature (°C)	27
Humidity (%)	44
Start of Layer	Posterior

Specimens 02 was then produced, changing the Linear Advance parameter to 25 and specimens 03, with Linear Advance of 25, Initial Horizontal Expansion of -0.2mm and Hole Size of 0.13mm, which were the resources used by [9]. By comparing the dimensions of these specimens at two different heights, it was possible to conclude that the parameters used by [9] were indeed the ones that produced specimens with dimensions closest to those of the CAD model. With this, the parameters for the production of the subsequent specimens were determined, Table 2.

Table 2. Specimen printing parameters.

Printing Parameters	**PLA**	**ABS**
Extrusion temperature (°C)	200	230
Table temperature (°C)	60	100
Height between nozzle and table (mm)	0.2	0.2
Filament diameter (mm)	1.75	1.75
Internal Filling (%)	20 and 100	20 and 100
Type of Filling	Line, Grid and Gyroid	Gyroid
Filling orientation	45°	45°
Print speed (mm/s)	50	50
Extrusion nozzle diameter (mm)	0.4	0.4
Linear Advance	25	25
Initial Horizontal Expansion (mm)	-0.2	-0.2
Hole size (mm)	13	13
Ambient temperature (°C) and Humidity (%)	23 to 28/ 44 to 65	23 to 28/50 to 65
Start of Layer	Posterior	Posterior

Regarding the percentage of internal filling, this study evaluated two extreme cases: 100%, representing the maximum setting, and 20%, the default value in the CURA program. This approach allowed for a comparative analysis of these contrasting scenarios. For the fill pattern, the line, grid, and gyroid types were selected arbitrarily for evaluation.

2.2.4. 3D printing

The specimens were manufactured on the Ender 3 Pro 3D printer, using 3D Lab PLA and ABS filaments, in a room with a monitored environment, with a temperature between 23 and 28ºC and humidity between 44 and 64%. In addition, to make it easier for the specimen to adhere to the table during extrusion, Scotch brand glue sticks made of polyvinyl were used.

2.3. Dimensional inspection

The dimensional survey of the parts took place in the Metrology Laboratory of the Brazilian Navy Research Institute, in a monitored environment with a temperature of 22°C and humidity between 45 and 60%. The measurement procedure for each dimension, internal and external diameter, was carried out by contacting the tool at four equidistant points at two different heights on the specimens, as shown in Fig. 4.

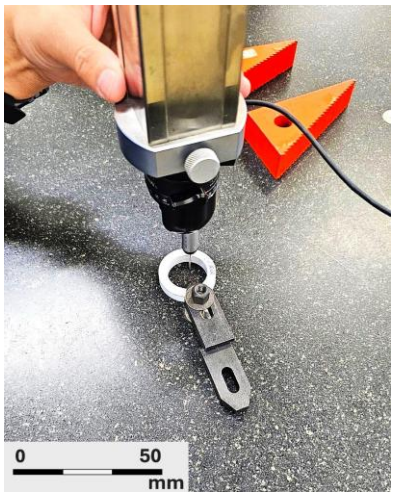


Fig. 4. Three-dimensional-machine contact point.

Measuring each dimension at two different heights is necessary due to the possible presence of the "elephant's foot" printing error, which corresponds to a dimensional variation that can occur at the base of the parts, resulting in an increase in dimension for external shaft measurements and a decrease for internal hole measurements. This discrepancy can occur due to the adjusted distance between the extruder nozzle and the printing table, which leads to compression of the material deposited in the first layers, causing the material to spill out laterally [9], as can be seen in Fig. 5.

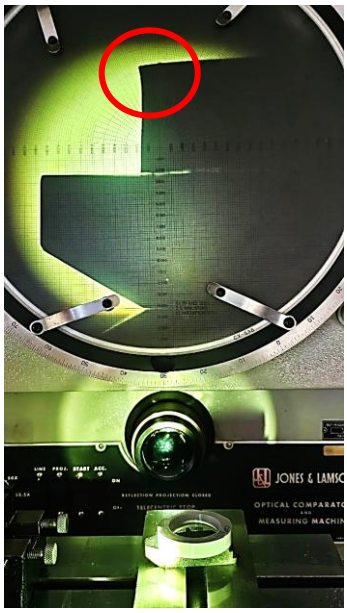


Fig. 5. Model printed on a profile projector showing the "Elephant's Foot" anomaly.

In this way, two heights were defined to be evaluated on the specimens (Fig. 6), the first with a height H1 = 1 mm, close to the first layers to evaluate the effect of the "elephant's foot", and the second H2 = 8 mm, far enough from the base to ensure that the "elephant's foot" does not significantly affect the nominal dimension of the specimens. Both measurements are referenced to the base of the printing table.

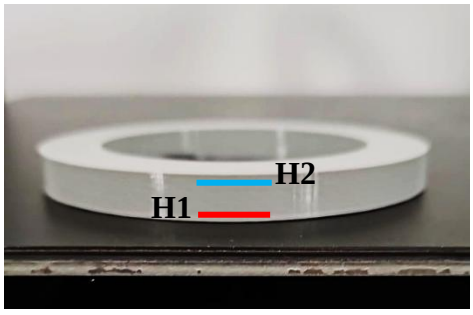


Fig. 6. H1 (red line) and H2 (blue line): Heights with and without of the "elephant's foot" effect, respectively.

2.4. Research methodology

For this study, the investigation procedure was to measure the dimensions of three standard specimens for each type (Line, Grid and Gyroid) and percentage (20 and 100%) of filling, as shown in Fig. 2. The average and standard deviation of the dimensions of the inner and outer diameters at heights H1 and H2 were checked for each specimen and then compared to see if they fell within the Dimensional Tolerance range of the DIN 7168 Standard, which is above 30 mm up to 120 mm with permissible deviations of 0.3 mm. The layout of the specimens produced can be seen in the flowchart shown in Fig. 7.

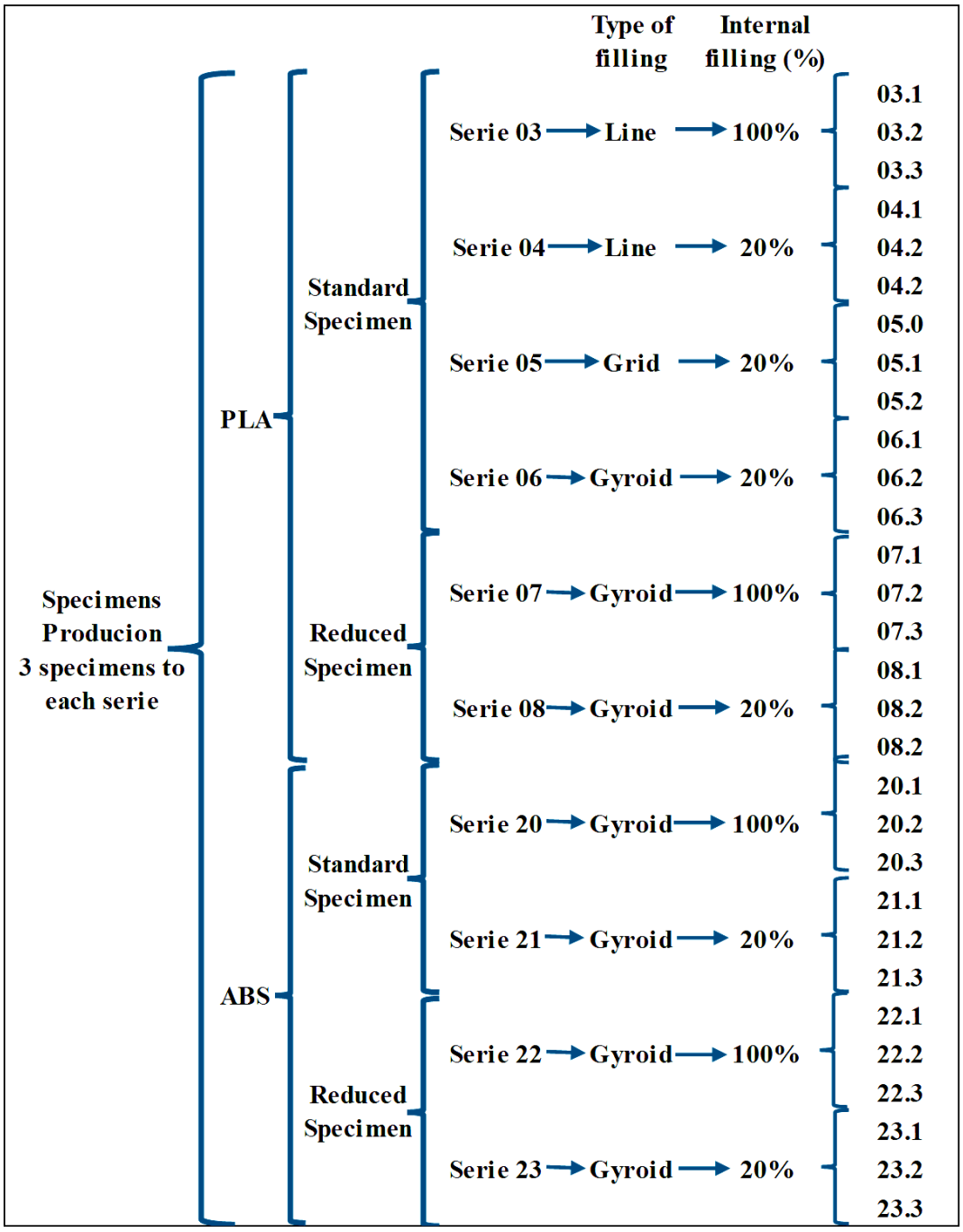


Fig. 7. Flowchart of the specimens.

In addition, a new evaluation was carried out by changing the external and internal diameters, reducing the values to half the initial value of specimen 03, Fig. 8.

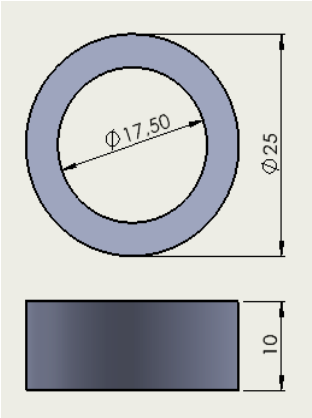


Fig. 8. Reduced specimen model.

Thus, with the specimens reduced, the dimensions of the outer and inner diameters fall within another range of Dimensional Tolerance of the DIN7168 Standard - Medium Grade, over 6 mm up to 30 mm with permissible deviations of 0.2 mm, which makes it possible to check whether the tolerances behave in relation to the order of magnitude of the dimensions.

For the specimens with smaller diameters, it was decided to evaluate only those produced in the percentage of 20% in the Gyroid pattern, as this was the pattern that showed the greatest discrepancy in relation to the nominal dimension of the CAD model in the initial investigation, and also with a percentage of 100% filling.

3. RESULTS

All the specimens had their internal and external diameters measured at the defined heights (H1 and H2), and then the average and standard deviation of each series was calculated. To illustrate the procedure for investigating the data collected, the values obtained for the H2 measurements of the specimens 03 series are shown in Table 3.

From Table 3 it can be seen that the average of the specimen 06 series, with a gyroid filling type, is furthest away from the average of the specimen 03 series for internal diameter, with a difference of 0.07 mm and 0.155 for the nominal value of 35 mm, but both also fall within the DIN 7168 - Medium Grade tolerance. It is also interesting to note that the difference is even smaller in the case of the outer diameter. It is also worth noting that the biggest difference between the specimen series measurements is 0.035 mm and the difference to the nominal value of 50 mm is 0.139 mm. Another important piece of information to note is that the specimen series with total filling has a larger outer diameter and a smaller inner diameter than the other series, probably due to the excess material deposited.

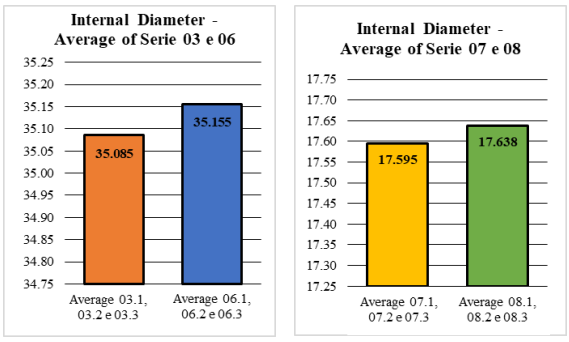
Table 4 shows the average values of the series of solid specimens (100% fill) and the series of specimens with 20% fill and with the patterns: Line, Grid and Gyroid.

Table 3. Results of the specimens 03 series.

Coding	H2		Internal Filling (%)	Type of Filling
	Int. D. (mm)	Ext. D. (mm)		
Specimen 03.1	35.079	49.785	100	Line
Specimen 03.2	35.031	49.878	100	Line
Specimen 03.3	35.014	49.839	100	Line
Average Specimen 03.1, 03.2, 03.3	35.041	49.834	100	Line
Standard Deviation	0.040	0.039		

Table 4. Averages and standard deviation - averages 03, 04, 05 and 06.

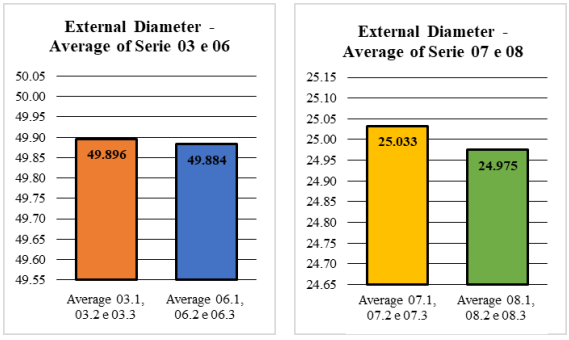
Coding	H2		Internal Filling (%)	Type of Filling
	Int. D. (mm)	Ext. D. (mm)		
Average Specimen 03.1, 03.2, 03.3	35.085	49.896	100	Line
Standard Deviation	0.040	0.039		
Average Specimen 04.1, 04.2, 04.3	35.107	49.861	20	Line
Standard Deviation	0.023	0.007		
Average Specimen 05.1, 05.2, 05.3	35.124	49.871	20	Grid
Standard Deviation	0.031	0.020		
Average Specimen 06.1, 06.2, 06.3	35.155	49.884	20	Gyroid
Standard Deviation	0.041	0.013		



(a) (b)

Fig. 9. Internal diameter data PLA: a) standard specimen PLA and b) reduce specimen PLA.

Figures 9 (a), 9 (b), 10 (a) e 10 (b) show the average values for the diameters of the specimens from the initial investigation, with a standard size, and the smaller specimens with a 50% reduction in diameter. In this way, it is possible to assess the tolerance relationship in another order of magnitude range.



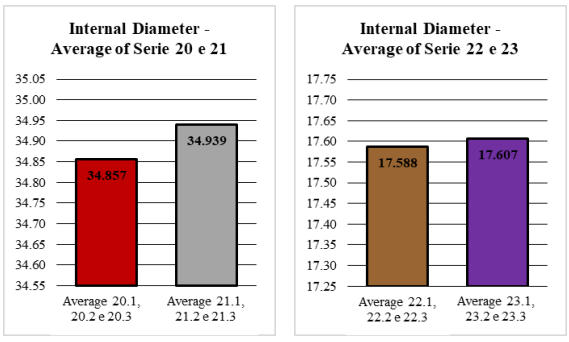
(a) (b)

Fig. 10. External diameter data PLA: a) standard specimen PLA and b) reduce specimen PLA.

Figures 9 (a) e 10 (a) show that the standard size series (specimens 03 and specimens 06) vary by 0.07 mm and 0.012 mm for the internal and external diameters, respectively, while the reduced specimens series do not. Figures 9 (b) e 10 (b), on the other hand, show a variation of 0.043 mm and 0.058 mm. As a result, it is not possible to observe a direct relationship between the tolerance and the order of magnitude of the measurements, but rather the same behaviour in the variation of the larger outer diameter and smaller inner diameter in the case of the solid specimens compared to the other specimens.

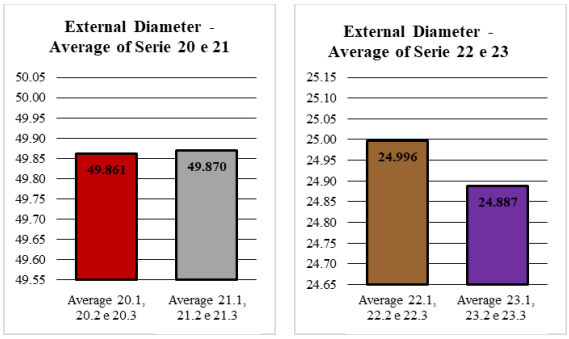
The same study was carried out for the ABS material and is shown in Figures 11 (a), 11 (b), 12 (a) e 12 (b), where it is possible to observe a similar behaviour to PLA. However, it should be noted that all the averages of the ABS material series are lower than the averages of their respective PLA material series.

In general, although all the results are within the tolerance recommended by DIN7168 Medium Grade standards, the standard deviation of the specimens is a maximum of 0.075mm.



(a) (b)

Fig.11. Internal diameter data ABS: a) standard specimen ABS and b) reduce specimen ABS.



(a) (b)

Fig. 12. External diameter data ABS: a) standard specimen ABS and b) reduce specimen ABS.

4. CONCLUSIONS

Based on the findings presented in this article, it can be concluded that it is feasible to produce series-manufactured components for final products using low-cost 3D printing machines and readily available materials. These components meet the dimensional requirements outlined in the DIN 7168 Medium Grade tolerance table. Consequently, their application in the mechanical structures of autonomous vehicles could offer significant value, particularly in politically sensitive scenarios.

In addition, the results presented confirm what was reported in the literature, i.e., that ABS material has a higher compression rate than PLA, and that solid printed parts tend to expand by increasing the external diameter and decreasing the internal diameter. Although the measurements obtained comply with the DIN 7168 Medium Grade standards, it is possible to achieve dimensions closer to nominal values by addressing systematic errors, such as those introduced during the three-dimensional modeling of the specimens. To meet the stricter requirements of DIN 7168 Fine Grade, further research should explore alternative materials and printing parameters. Future studies will also focus on the dimensional evaluation of additional geometric shapes.

Environmental factors, such as temperature and humidity during the additive manufacturing (AM) process, can significantly impact dimensional stability. Variations in ambient temperature may lead to uneven

cooling and thermal stresses, while fluctuations in humidity can affect the material properties of hygroscopic polymers like PLA investigated here. A study of these variables would provide a deeper understanding of their influence on dimensional accuracy and part quality and will be considered in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to acknowledge the support of the Mechanics Prototyping Laboratory, the Metrology Laboratory, both of the Brazilian Navy Research Institute, and the Federal Center of Technological Education (CEFET/RJ).

REFERENCES

[1] **M. Dunbabin, L. Marque,** *Robotics for Environmental Monitoring*, [From the Guest Editors], IEEE Robotics & Automation Magazine, IEEE, v. 19, n. 1, p. 20–23, 2012.
[2] **W. H. Adnan, et al.,** *Drone Use in Military and Civilian Application: Risk to National Security*, Journal of Media and Information Warfare, v. 15(1), p. 60-70, 2022.
[3] **P. Mahadevan,** *The Military Utility of Drones*, CSS Analyses in Security Policy V.78, Center for Security Studies (CSS), ETH Zurich, 2010.
[4] **S. C. Ligon, et al.,** *Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing*, Chemical Reviews, n. 117, p. 10212–10290, 2017.
[5] **E. C. Mendonça, et al.,** *Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva*, Revista Pesquisa Naval, n. 32, p. 10-16, 2020.
[6] **N. Muralidharan, et al.,** *Structural analysis of mini drone developed using 3D printing technique*, Materials Today: Proceedings, n. 46, p. 8748–8752, 2021.
[7] **R. Radharamanan, et al.,** *Use of 3D Printers to Design, Build, Test and Fly a Quadcopter Drone*, The Journal of Management and Engineering Integration Vol. 9, No. 1, 2016.
[8] **M. Looney,** *The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment*, Analog Dialogue p. 49-06, June 2015.
[9] **I. Grgić, et al.,** *Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields*, Processes 2023, 11, 2810, 2023.
[10] **O. Zemicik, J. Sedlak,** *Application of Linear Optimization on Parameters of 3D FDM Print*, Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, v. 26, n. 4, jul. 2019.
[11] **F. O. Drozda, T.R. Pereira, A. E. Patterson,** *End-User Manufacturing with FDM/FFF: Interfaces, Tolerances, Repeatability, and Dimensional Accuracy*, 2020 IISE Annual Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, 2020.
[12] **P. Schaechtl, B. Schleich, and S. Wartzack,** *Statistical Tolerance Analysis of 3D-Printed Non-Assembly Mechanisms in Motion Using Empirical Predictive Models*, Applied Sciences, v. 11, n. 4, p. 1860, 20 fev. 2021.
[13] **J. Kacmarcik, et al.,** *An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 393, p. 012085, 10 ago. 2018.
[14] **P. Pombinha, et al.,** *A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in Fdm*, 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018), Singapore, p. 14–17, May 2018.
[15] **DIN 7168,** *General tolerances for linear and angular dimensions and geometrical tolerances*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1991.
[16] **A. A. Gorni,** *Introdução a prototipagem rápida e seus processos*, Revista Plástico Industrial, p. 230–239, 2001.
[17] **S. Ahn, et al,** *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid prototyping journal, 2002.
[18] **Cavalcanti D. K. K., Banea M. D., de Queiroz H. F. M.,** *Effect of material on the mechanical properties of additive manufactured thermoplastic part*. Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, vol. 31, 2020.
[19] **Carrasco F., Pagès P., Gámez-Pérez J., Santana O. O., Maspoch M. L.,** *Processing of poly(lactic acid): characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties*, Polymer Degradation and Stability, vol. 95, 2010, pp. 116-125.
[20] **Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D.,** *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, Composites Part B: Engineering. vol. 143, 2018, pp. 172-196.

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO/DIVULGAÇÃO DE DOCUMENTO ELETRÔNICO NO CATÁLOGO DO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO CEFET/RJ E NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação abaixo citada, de acordo com a Lei nº 9610/98, autorizo, a partir da presente data, o CEFET/RJ, a disponibilizar gratuitamente, sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissões assinadas abaixo, no Catálogo Online do Sistema de Bibliotecas e no Repositório Institucional do Cefet/RJ, ou qualquer outro formato de disseminação da informação que a instituição implemente, no formato PDF, para fins de leitura, impressão e/ou download pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada por esta Instituição.

1- Tipo de trabalho: [ ] Projeto Final (Graduação) [ ] Especialização
[X] Dissertação [ ] Tese

2- Identificação do trabalho/autor(es):

Curso: Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais
Título: Avaliação Dimensional de Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva Embarcadas em Veículos Submarinos Autônomos
Autor(es): Filipe Pereira Berardi
Orientador: Doina Mariana Banea

3- Informações de acesso ao trabalho:

Este trabalho é confidencial? [ ] Sim [X] Não
Pode ser liberado para publicação? [X] Total [ ] Parcial [ ] Não
Justifique:_____
_____
Em caso de publicação parcial, assinale as permissões:
[ ] Sumário
[ ] Capítulos. Especifique: _____
[ ] Bibliografia
[ ] Outras partes do trabalho: _____

Rio de Janeiro, _22_/_01_/_2026_

gov.br Documento assinado digitalmente
FILIPE PEREIRA BERARDI
Data: 22/01/2026 09:28:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Assinatura do(s) autor(es)

DOINA MARIANA BANEA:85425028091

Assinado de forma digital por DOINA MARIANA BANEA:85425028091
Dados: 2026.01.23 18:26:58 Z

_____
Assinatura do orientador